

Revoir

Progrès récents en électrochimie appliquée : une revue

Paolo Yammine ^{1,*} , Hanna El-Nakat ¹, Rima Kasab ¹, Agapy Mansour ¹, Bilal El Khoury ¹, Diala Koumeir ¹, Zeinab Matar ¹ et Ayman Chmayssem ^{1,2,*} 

¹ Université de Balamand, Faculté des Arts et des Sciences, Département de Chimie, Tripoli PO Box 100, Liban

² Electrochemistry Consulting & Services (E2CS), fondateur, Tripoli PO Box 100, Liban

* Correspondance : paolo.yammine@balamand.edu.lb (PY) ; ayman.chmayssem@fty.balamand.edu.lb (AC) ;
Tél. : +00961-6-931 952 (poste 3841) (PY)

Résumé : L'électrochimie appliquée (AE) joue aujourd'hui un rôle important dans un large éventail de domaines, notamment la conversion et le stockage de l'énergie, les procédés, l'environnement, la chimie (bio)analytique et bien d'autres. La synthèse électrochimique s'avère désormais être une voie prometteuse pour éviter tous les inconvénients en termes de consommation d'énergie élevée et de pollution élevée, tandis que la modélisation électrochimique devient un outil puissant pour comprendre les systèmes complexes et prédire et optimiser les dispositifs électrochimiques dans diverses conditions, ce qui réduit le temps et les coûts d'étude. Le rôle vital de l'électrochimie sera être grandement envisagé dans les années à venir, dans le but de réduire l'empreinte carbone et de soutenir la transition vers un cadre énergétique vert et plus durable. Cet article de synthèse résume les progrès récents de l'électrochimie appliquée. Il montre comment ce domaine est devenu un outil indispensable pour l'innovation, le progrès, la résolution de problèmes dans le monde moderne et la résolution de problèmes sociétaux. défis dans divers domaines.

Mots clés : électrochimie ; décarburation; conversion et stockage d'énergie; environnemental durabilité; fabrication



Citation : Yammine, P. ; El-Nakat, H. ;
Kassab, R. ; Mansour, A. ; El Khoury, B. ;
Koumeir, D. ; Matar, Z. ; Chmayssem,
A. Progrès récents dans les domaines appliqués
Électrochimie : une revue.
Chimie 2024, 6, 407-434. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030024>
est ce que je.org/10.3390/chemistry6030024

Rédacteur académique : Michael Lyons

Reçu : 29 avril 2024

Révisé : 16 mai 2024

Accepté : 17 mai 2024

Publié : 23 mai 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs.
Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès
distribué selon les termes et
conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

L'électrochimie appliquée (AE) est une science moderne de pointe qui répond aux défis sociétaux dans divers domaines, notamment la conversion et le stockage de l'énergie, les processus, l'environnement, la chimie (bio)analytique et bien d'autres [1-3]. Dans le secteur de l'énergie, l'électrochimie les processus sont utilisés pour la conversion et le stockage de l'énergie. Cela permet le développement de des technologies productives et durables, telles que les batteries [4,5], les piles à combustible [6,7] et les électrolyses [8,9]. Par conséquent, ces progrès contribuent à l'intégration des énergies renouvelables énergétiques et soutenir la transition vers des sources d'énergie vertes et plus durables.

Dans le domaine de l'environnement, l'électrochimie apporte de nouvelles solutions pour le contrôle de la pollution et le traitement de l'eau. Des procédés électrochimiques, tels que des procédés d'oxydation électrochimique directe et indirecte et des procédés d'oxydation avancés, sont utilisés pour la dégradation des polluants organiques [10], élimination des métaux lourds [11-13] et valorisation des effluents » biodégradabilité [14,15]. Ces technologies offrent des approches efficaces et rentables pour relever les défis environnementaux, protéger les écosystèmes et améliorer la qualité de l'eau.

Dans le secteur manufacturier, l'électrochimie joue un rôle essentiel dans l'électrosynthèse, fabrication de matériaux et modification de surface. Les techniques électrochimiques, telles que la galvanoplastie [16], l'électroformage [17] et l'usinage électrochimique [18], sont utilisés pour produire des revêtements fonctionnels et protecteurs et améliorer les performances des matériaux et composants. Ces processus permettent la production de produits de haute qualité avec des propriétés matérielles améliorées et une durabilité élevée. Par exemple, l'électrochimie Les traitements de surface des matériaux dans les industries métallurgiques visent, en premier lieu, à créer des matériaux ayant une surface géométrique plus élevée et, d'autre part, pour permettre la création d'un couche épaisse d'oxyde métallique qui protège et stabilise la nanostructure du métal ou du semi-conducteur [19,20].

champs (Figure 1).



2.1. Conversion et stockage d'énergie

L'énergie nous entoure tout le temps, alimentant nos activités de jour comme de nuit. Nous avons souvent prendre pour acquis la commodité d'accéder à l'énergie pour alimenter nos gadgets, appareils électroménagers, machines et véhicules. Cependant, il est crucial de réfléchir à la manière dont nous stockons cette énergie pour utiliser [55]. Contrairement aux combustibles fossiles, qui peuvent être facilement stockés et transportés dans leurs

Dans l'état actuel des choses, les sources d'énergie renouvelables, telles que la lumière solaire et le vent, nécessitent une méthode de stockage intermédiaire en raison de leur nature intermittente. En conséquence, les batteries sont considérées comme la seule solution pour stocker cette énergie, afin qu'elle puisse être utilisée en cas de besoin, constituant ainsi un pont crucial entre la production et la consommation d'énergie [56,57].

Il existe deux types de batteries, à savoir celles stockant de l'énergie pour un usage unique, comme les batteries non rechargeables, et celles à usage multiple, illustrées par les batteries rechargeables.

Nous nous concentrons sur les batteries connues pour leur capacité à stocker et à libérer de l'énergie de manière répétée, ce qui conduit à une rentabilité et un respect de l'environnement dans diverses applications [58]. Les applications des batteries se répartissent en trois catégories principales : les transports et l'automobile, y compris les véhicules électriques (VE) ; appareils électroniques portables; et le stockage d'énergie stationnaire, chaque type exigeant des spécifications uniques. Le tableau 1 résume les différents types de batteries commerciales utilisées pour le stockage d'énergie et leurs principales applications, avantages et inconvénients.

En fait, les progrès des véhicules électriques dépendent fortement de l'amélioration de la technologie des batteries, qui se heurte à divers obstacles, tels que des batteries sous-développées et des défis dans les applications pratiques [59]. Les batteries au plomb (Pb-A) ont historiquement dominé le marché des batteries rechargeables, en particulier dans le secteur automobile, en raison de leur part de marché importante en termes de valeur des ventes et de production d'énergie. Cependant, les batteries Pb-A présentent des limites inhérentes, notamment une durée de vie relativement courte, une faible densité énergétique, une susceptibilité à la stratification acide et aux fuites en cas de dommage, ainsi que des difficultés de réduction en raison de problèmes liés à la production de plomb. De plus, les impacts environnementaux associés aux batteries au plomb sont bien documentés [60,61], nécessitant des efforts de recyclage approfondis pour atténuer leurs effets négatifs. Par conséquent, les batteries lithium-ion (LIB) sont apparues comme une alternative prometteuse, gagnant du terrain en raison de leurs nombreux avantages, notamment une efficacité de stockage élevée proche de 100 % et offrant une gamme diversifiée de produits chimiques, ce qui les rend adaptées à diverses applications durables. demandes [62]. Dans les conceptions les plus courantes de LIB, les cellules sont constituées d'une électrode négative appelée anode et d'une électrode positive appelée cathode séparées par un séparateur isolant et entourées d'un électrolyte. Pendant la décharge, les ions lithium sont transportés de l'anode, à travers le séparateur jusqu'à la cathode et liés au matériau actif. Simultanément, les électrons sont libérés et conduits via un circuit externe de l'anode à la cathode. Lors du chargement du LIB, les mouvements des ions lithium et des électrons sont inversés par une alimentation connectée [63].

Ces dernières années, une attention particulière a été portée au développement du cathétérisme. des codes pour qu'ils soient plus durables et plus sûrs. Ces efforts ont abouti à la commercialisation de différents matériaux cathodiques sur le marché des véhicules électriques, notamment $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NCA), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (LNMO) [64], LiFePO_4 (LFP) et $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC) - batteries basées. Chacun de ces matériaux offre son propre ensemble d'avantages par rapport aux autres [65]. Les batteries basées sur NCA, LFP et NMC sont largement utilisées dans les véhicules électriques produits par des sociétés comme BMW, Chevrolet, Nissan, Tesla, etc. [66]. Bien que des batteries Li-air et Li-S aient été fabriquées, elles ne sont pas encore prêtes pour les applications automobiles. Cependant, les batteries sodium-ion apparaissent comme une alternative potentielle aux batteries lithium-ion.

D'un autre côté, les appareils personnels, notamment les smartphones, les ordinateurs portables, les tablettes, les appareils photo et les technologies portables, dépendent fortement du stockage d'énergie pour fonctionner efficacement dans des conceptions compactes. Les batteries constituent la principale source d'alimentation de ces appareils, nécessitant des capacités de stockage relativement petites dans des volumes limités et des formats légers. Parmi les types de batteries, les LIB, en particulier celles utilisant du LMO et du LiCoO_2 , se distinguent comme étant particulièrement bien adaptées à l'électronique à petite échelle. Ils servent de cathode d'alimentation principale dans une variété d'appareils, des smartphones et ordinateurs aux outils électriques. De plus, l'utilité des LIB s'étend au-delà de l'alimentation des appareils électroniques portables et des transports. Ils jouent désormais un rôle essentiel dans le soutien du réseau électrique. Cette expansion permet l'intégration de sources d'énergie renouvelables variables, améliorant finalement l'efficacité des systèmes de transport et de distribution [67].

Tableau 1. Résumé des dispositifs de stockage d'énergie (batteries), avec leurs applications, avantages et inconvénients.

Type de batterie	Chimie de la batterie	Principal Application	Spécifique Énergie (Wh/Kg)	Avantages	Désavantages
Acide de plomb [58]	Pb-A	Industrie automobile (VE) et usage industriel	30-50	- Faible coût - Des procédés de fabrication bien établis et largement disponibles - Performances élevées dans diverses conditions	- Densité énergétique limitée - Durée de vie courte (500 à 1 000 cycles) - Exigences de maintenance impliquant des problèmes tels que la stratification acide et les fuites -Préoccupations environnementales liées à l'utilisation du plomb (métal lourd) - Utilisation limitée dans les applications où le poids est une préoccupation
Batteries lithium-ion (LIB) (Beaucoup de chimies possibles), [63,65] Les LIB ont une densité énergétique plus élevée, permettant des conceptions plus légères, une stabilité et une durabilité supérieures à celles du Pb-A. Sensible aux basses températures, mais améliorations en cours et devenant plus compétitif au fil des progrès.	Oxyde de lithium et de manganèse (LMO)	Appareils électroniques portables (par exemple, smartphones, ordinateurs portables) – Outils électriques	100-150	- Moindre coût - Amélioration du respect de l'environnement - Meilleure stabilité thermique et sécurité par rapport aux LCO, ce qui les rend adaptés à certains véhicules électriques	- Densité énergétique plus faible - Durée de vie réduite (300 à 700 cycles)
	Oxyde de lithium et de cobalt (LCO)		150-250	-Densité énergétique plus élevée. -Durée de vie plus longue (500 à 1 000 cycles)	- Coût plus élevé - Préoccupations environnementales dues à l'extraction du cobalt
	Phosphate de fer et de lithium (LFP)	Outils électriques et véhicules électriques	90-120	- Le plus sûr - Meilleure stabilité thermique	- Densité d'énergie la plus faible parmi les trois cathodes
	Lithium Nickel Cobalt Oxyde d'aluminium (NCA)	Stockage en réseau et véhicules électriques	155-260	- Densité énergétique la plus élevée	- Stabilité thermique inférieure - Systèmes de gestion thermique des batteries Exigences (BTMS)
	Lithium Nickel Manganèse Cobalt Oxyde (NMC)	Outils électriques, VE	150-200	- Densité énergétique et sécurité modérées	- Exigences BTMS
Piles à base de polymère, [68,69] Entreprise: Evonik - Utiliser des techniques de traitement uniques telles que l'impression	Polymères actifs redox pour la cathode, l'anode ou les deux électrodes.	Domaines Médical et Logistique	50-200	- Fabrication de batteries fines et flexibles - Capacité à haut débit - Sans métal et recyclable	- Limitations en termes de capacités de décharge et de sorties de tension - Applicabilité limitée aux systèmes à faible consommation
Biocarburant [70-74]	Piles à combustible enzymatiques	Idéal pour les wearables et les implants : - Compacte - Intégrable - Biosécurité	20 à 300	- Peu coûteux - Poids léger - Flexible	- Faible densité énergétique - Stabilité à court terme (diminution de la puissance de sortie au fil du temps)
	Piles à combustible microbiennes	Axé sur la production d'électricité à grande échelle à partir de l'environnement - Convient à Applications à demande de puissance minimale (ex: traitement des eaux usées)		- Respectueux de la nature - Biodégradable - Capable de produire de l'électricité à partir de divers types de matières organiques	

Une stratégie alternative sur le point d'être commercialisée, outre le développement de cathodes, consiste à passer des anodes en graphite aux anodes en silicium. Le silicium, un matériau abondant, non toxique et économique, offre une capacité de stockage nettement supérieure. Les premières tentatives visant à créer des anodes uniquement à partir de silicium pur ont échoué. Cependant, une approche plus prometteuse, désormais développée par l'industrie, consiste à incorporer des additifs poreux ou d'autres additifs carbonés dans l'anode [75]. Actuellement, divers fabricants, tels que Varta, Sila Nanotechnologies, Enovix Corporation, Gotion High-Tech et d'autres, travaillent activement sur des anodes composites avec des proportions variables, mais croissantes, de silicium et/ou de SiOx ou de TiSi [76]. Le remplacement des électrodes conventionnelles comme le graphite ou le silicium par du graphène peut améliorer la stabilité et la durée de vie de la batterie, tout en offrant une densité énergétique plus élevée à moindre coût. Cependant, les contraintes structurelles du graphène limitent la taille des batteries, limitant ainsi la capacité de stockage d'énergie principalement aux petits appareils, les rendant impropres aux grandes batteries, y compris celles des véhicules électriques (77, 78).

Les progrès actuels de la nanotechnologie se concentrent sur la miniaturisation des appareils électroniques pour fournir de l'énergie à la demande. Les micro/nanobatteries à base de lithium-ion sont d'excellents candidats à cet effet, car elles se caractérisent par une petite taille, un poids léger, une capacité élevée et une longue durée de vie, et elles offrent également stabilité et sécurité, ce qui les rend adaptées au stockage d'énergie dans les micro-appareils et applications portables [79]. Outre le développement des batteries à base de métal, les batteries organiques, également appelées batteries à base de polymère, présentent plusieurs avantages par rapport à leurs homologues classiques à base de métal : elles ne contiennent aucun métal lourd toxique et rare, leurs matières premières organiques peuvent potentiellement être obtenus à partir de ressources renouvelables et, à la fin du cycle de vie, ils peuvent être éliminés par incinération sans restes toxiques. Au début des années 2000, différentes applications potentielles ont été explorées pour ces batteries, plus respectueuses de l'environnement. Néanmoins, ces systèmes n'ont pas trouvé d'applications commerciales jusqu'à aujourd'hui, Evonik Industries étant actuellement à l'avant-garde dans la fourniture de matériaux pour batteries imprimables à base de polymères, qui peuvent être utilisées dans des dispositifs minces et flexibles [69,80]. Les biobatteries basées sur des biopiles apparaissent également comme une solution à zéro émission nette de CO₂. Bien qu'elles soient encore en phase de développement, ces biobatteries assurent un stockage d'énergie propre, sûr, durable et efficace, conforme aux futurs objectifs climatiques. Ils utilisent des enzymes, des organites ou des micro-organismes comme biocatalyseurs respectueux de l'environnement pour convertir l'énergie chimique ou biologique en énergie électrique, permettant ainsi une production d'énergie durable pour les appareils portables, portables, implantables ou ingérables, ainsi qu'offrant des solutions à long terme pour l'électronique environnementale sans surcharge. La société BeFC (Bioenzymatic Fuel Cells) a développé les premières biopiles à combustible en papier rentables et efficaces. Ces cellules sont sans métal, organiques, recyclables, compostables, sûres et durables.

Avec l'augmentation attendue de la demande de batteries d'ici 2050, Verkor, dont le siège est en France, a lancé une gigafactory de batteries. Leur objectif est de fabriquer des batteries électriques à faible émission de carbone et hautes performances, principalement des LIB, pour soutenir les efforts de mobilité durable. Cette initiative vise à réduire la dépendance à l'égard des fabricants chinois de batteries et à créer davantage d'opportunités d'emploi.

Outre l'utilisation de batteries avec zéro émission nette de CO₂, le recyclage des batteries est crucial [58]. La plupart des matériaux des batteries étant recyclables, il est essentiel d'investir dans des pratiques durables pour atténuer l'impact environnemental et répondre aux besoins énergétiques croissants. Consciente de cette nécessité, la société suédoise de batteries NorthVolt et sa filiale Revolt, qui s'occupe du recyclage, ont été créées. Ces installations sont dédiées non seulement à la production de batteries de haute qualité, mais également à la mise en œuvre de stratégies globales de recyclage. De la sélection initiale des composants (batteries dépourvues de Li ou Co) au processus de recyclage en fin de vie, ces entreprises jouent un rôle central dans la minimisation de l'épuisement des ressources et la réduction des émissions de carbone associées à la production et à l'élimination des batteries (Figure 2).

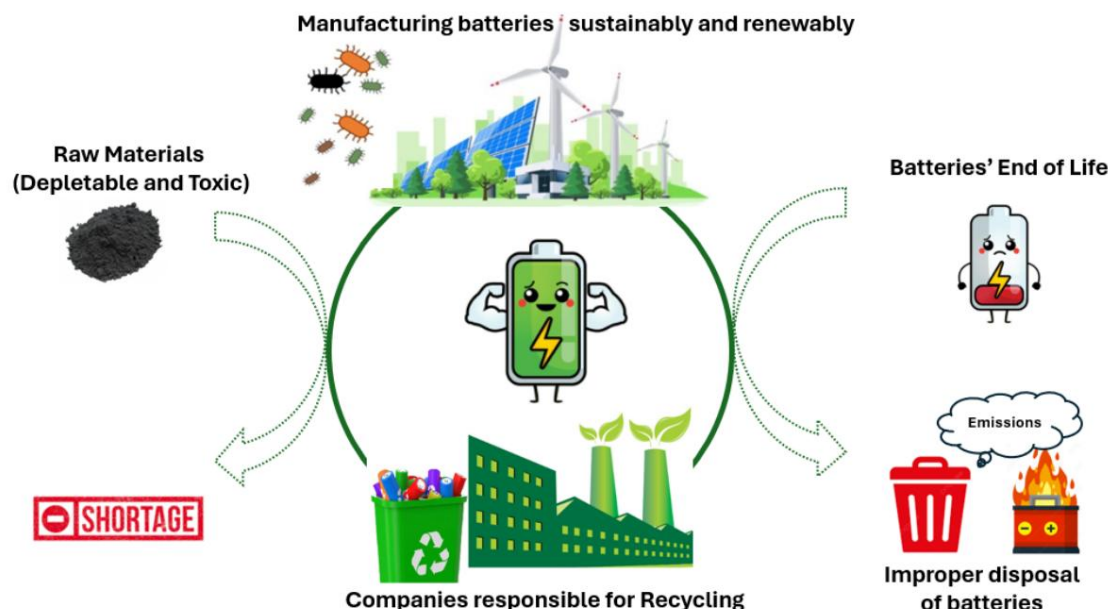


Figure 2. Illustration de la fabrication de batteries à l'aide de matières premières, telles que Pb, Li et Co, et leur tendance à la pénurie à long terme (partie gauche), suivie de leur phase de fin de vie après leur utilisation et élimination inappropriée, ce qui présente des dangers (côté droit). Au centre, la tendance entre le réemploi et l'élimination inappropriée, qui présente des risques (côté droit). Au centre, la tendance des entreprises récentes et futures est de recycler les batteries et d'en fabriquer de nouvelles de manière durable, en utilisant des ressources renouvelables, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les bactéries et les enzymes.

2.2. Caractérisation des matériaux

La caractérisation électrochimique fait référence à une gamme de techniques dans le domaine de l'électrochimie utilisée pour analyser et comprendre les propriétés et les comportements de matériaux ou de systèmes. Ces techniques comprennent l'application de stimuli électriques et la mesure des signaux électriques ou électrochimiques résultants pour obtenir un aperçu de diverses propriétés, tels que la conductivité, la réactivité de surface [82], la résistance à la corrosion [83], l'activité catalytique [84], et le transport d'ions [85]. Les techniques de caractérisation électrochimique sont des outils précieux pour l'analyse des deux espèces en solution et à l'état solide.

Pour les espèces dissoutes dans une solution, des techniques courantes, telles que la voltammétrie cyclique, la chronoampérométrie, la potentiométrie et la spectroscopie d'impédance sont utilisées pour la caractérisation électrochimique. Cependant, pour les matériaux solides, les microélectrodes à cavité sont généralement utilisées. Pour caractériser les espèces électroactives, des solides sont insérés dans la cavité de la microélectrode et une caractérisation électrochimique est effectuée. Dans cette partie, chacun la technique est brièvement décrite et des exemples sont donnés.

La voltammétrie cyclique (CV) est une méthode électrochimique puissante et populaire couramment utilisée pour explorer les processus de réduction et d'oxydation des espèces moléculaires. Le CV est aussi utile pour étudier les réactions chimiques initiées par transfert d'électrons, y compris la catalyse, fournir des informations sur les processus catalytiques et faciliter la compréhension du redox mécanismes dans divers systèmes [27]. La voltammétrie cyclique caractérise l'électrochimie systèmes en mesurant la réponse en courant (i) en fonction de la tension appliquée (E) (i vs. E), fournissant des informations sur les réactions redox, la cinétique de transfert d'électrons et la stabilité de espèces électroactives [86]. Cette technique consiste à balayer de manière linéaire et cyclique le Tension tout en surveillant la réponse actuelle résultante, permettant des potentiels de crête, des crêtes courants et autres paramètres électrochimiques à déterminer [87]. En CV, le majordome—L'équation de Volmer (équation (1)) est souvent utilisée pour modéliser la cinétique du transfert d'électrons au niveau interface d'électrode comme suit :

$$j_e = i_0 \left(\exp \frac{\alpha n F \eta}{RT} - \exp \frac{-(1-\alpha) n F \eta}{RT} \right) \quad (1)$$

où i est la densité de courant, i_0 est la densité de courant d'échange (en A/m²), α est le coefficient de transfert de charge (sans dimension), n est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction de l'électrode, R et F sont respectivement les gaz parfait et les constantes de Faraday, T est la température et η est le surpotentiel, défini comme la différence entre le potentiel d'électrode appliqué et le potentiel d'équilibre pour la réaction d'électrode.

D'autre part, la chronoampérométrie est une technique électrochimique qui mesure le courant électrique (i) en fonction du temps (i vs t) lorsqu'un potentiel électrique constant (E) est appliqué à une électrode. Contrairement à la voltammétrie cyclique, qui consiste à appliquer un potentiel qui varie de manière cyclique, la chronoampérométrie maintient un potentiel constant et mesure le courant électrique résultant au fil du temps selon la loi de Cottrell (équation (2)). Cette technique est souvent utilisée pour étudier les réactions électrochimiques avec des matériaux d'électrode spécifiques et pour déterminer les constantes cinétiques des réactions électrochimiques [88,89].

$$i = \frac{nFA D^{1/2} i_0}{\pi^{1/2} t^{1/2}} \quad (2)$$

où i est le courant, n est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction électrochimique, F est la constante de Faraday, A est l'aire de l'électrode, D est le coefficient de diffusion des espèces électroactives, C est la concentration des espèces électroactives, et t est le temps (en secondes).

L'ampérométrie à l'état d'équilibre utilisant des microélectrodes et basée sur des expériences par étapes potentielles est largement considérée comme offrant une précision supérieure pour la surveillance de l'état de charge (SOC) dans les électrolytes de la batterie à flux redox (RFB). Une nouvelle méthode analytique pour les mesures ampérométriques de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) dans les électrolytes individuels de la batterie à flux redox (RFB) a été développée, en se concentrant sur les signaux de courant transitoire obtenus dans des expériences d'étapes de potentiel chronoampérométriques [90].

D'autre part, la mesure potentiométrique est une technique utilisée pour déterminer la concentration d'ions dans une solution en mesurant la différence de potentiel électrique (ΔE) entre une électrode de référence (généralement Ag/AgCl) ou une pseudo-électrode de référence et une électrode de travail. électrode [91–93] en fonction du temps (ΔE vs. t). Cette méthode est basée sur l'équation de Nernst (équation (3)), qui relie le potentiel mesuré à la concentration d'ions dans la solution. Il se caractérise par sa simplicité et sa sensibilité ; cependant, la présence de différents ions dans la solution conduit à mesurer un potentiel mixte proportionnel à la concentration de l'ion.

$$E_{\text{Cellule}} = E^0 \ln + \frac{RT}{nF} \frac{[\text{Bœuf}]}{[\text{Rouge}]} \quad (3)$$

où R et F sont respectivement le gaz parfait et les constantes de Faraday, n est le nombre d'électrons, T est la température et E^0 est le potentiel standard de l'analyte cible.

Dans le domaine des batteries, le coefficient d'entropie ($dUOC/dT$) constitue un paramètre crucial pour prédire la génération de chaleur dans les batteries lithium-ion (LiB), en particulier dans des conditions de faible cadence. Bien que la méthode potentiométrique soit couramment utilisée pour la mesure du coefficient d'entropie, sa précision se fait au détriment du temps. Par conséquent, il existe un besoin critique d'une technique de mesure d'entropie efficace et précise. La méthode potentiométrique améliorée, rapide et précise, connue sous le nom d'ajustement positif (PA), réduit le temps de relaxation à 10 min. Des cellules lithium-ion 18650 commerciales sont utilisées pour valider la méthode PA. Une comparaison entre les profils d'entropie obtenus par la méthode PA et la méthode potentiométrique conventionnelle (CPM) indique une précision comparable, avec une erreur moyenne de $\pm 0,01$ mV/K. Même comparée aux méthodes alternatives récentes, la méthode PA démontre des avantages notables en termes d'efficacité de mesure [94].

A l'inverse, la mesure d'impédance (Z) est une technique utilisée pour caractériser le comportement électrique d'un système en réponse à un signal électrique alternatif (pour une plage de fréquence fixe) [95]. L'impédance est une mesure de la résistance d'un circuit électrique au courant alternatif (conformément à la loi d'Ohm) et peut inclure des composants de résistance, de capacité

inductance. Il existe plusieurs techniques de mesure d'impédance, telles que la mesure électrochimique spectroscopie d'impédance (EIS), largement utilisée pour étudier les processus électrochimiques dans les batteries [96,97], les capteurs [98,99] et d'autres systèmes électrochimiques (Figure 3). Technique de mesure dans le domaine temporel utilisant un modèle de circuit équivalent prédéfini, comprenant de nombreux éléments parallèles de résistances et de condensateurs connectés en série, a été exploré comme un des moyens de mesure du spectre d'impédance électrochimique d'une batterie lithium-ion, tout en excluant les impédances apparentes résultant des changements de tension en circuit ouvert dans la gamme des basses fréquences. Dans un premier temps, une étude expérimentale approfondie a été menée pour déterminer les conditions optimales pour le signal appliqué adapté à cette technique. Il a été établi qu'un spectre d'impédance allant de plusieurs dizaines de microhertz à plusieurs dizaines de millihertz pourraient être mesurés avec précision en sélectionnant un appareil approprié à faible débit, et une charge ou une décharge à courant constant de longue durée comme signal appliqué. Ensuite, spectres d'impédance, à l'exclusion des impédances apparentes résultant de la tension en circuit ouvert les changements ont été mesurés dans diverses conditions en utilisant cette technique. Les fondamentaux caractéristiques des impédances associées aux processus de diffusion à l'état solide de le lithium dans la plage de basse fréquence correspondante a été examiné. Il a été révélé que le spectre d'impédance, à l'exclusion des impédances apparentes résultant d'un circuit ouvert changements de tension dans la plage des basses fréquences (allant de plusieurs dizaines de microhertz à plusieurs dizaines de millihertz), pourraient être raisonnablement séparés en deux Warburg de longueur finie impédances. Ces impédances pourraient être clairement caractérisées par des différences dans leurs valeurs de constante de temps de diffusion et par la dépendance de leurs résistances de diffusion à l'état de charge. De plus, une dépendance à la température de type Arrhenius a été confirmée pour leurs deux résistances de diffusion. Une technique de mesure dans le domaine temporel utilisant un équivalent prédéfini Le modèle de circuit (ECM) a été examiné pour l'analyse du spectre d'impédance électrochimique dans batteries lithium-ion (LIB). Des études expérimentales ont déterminé les conditions de signal optimales, permettant des mesures précises dans la plage des basses fréquences. Les spectres d'impédance, excluant les impédances apparentes dues aux changements de tension en circuit ouvert, ont été analysés, révélant caractéristiques distinctes liées au SOC et à la température de la batterie. Cette technique a permis la séparation de deux impédances de Warburg de longueur finie avec une constante de temps de diffusion claire valeurs et dépendances SOC. Des variations minimales ont été observées dans les constantes de temps de diffusion, démontrant leur potentiel pour une analyse précise de l'impédance dans les batteries. Cette technique a permis la séparation de deux impédances de Warburg de longueur finie avec une constante de temps de diffusion claire valeurs et dépendances SOC. Des variations minimales ont été observées dans les constantes de temps de diffusion, démontrant leur potentiel pour une analyse précise de l'impédance dans les batteries. Cette technique a permis la séparation de deux impédances de Warburg de longueur finie avec une constante de temps de diffusion claire valeurs et dépendances SOC. Des variations minimales ont été observées dans les constantes de temps de diffusion, démontrant leur potentiel pour une analyse précise de l'impédance dans les batteries.

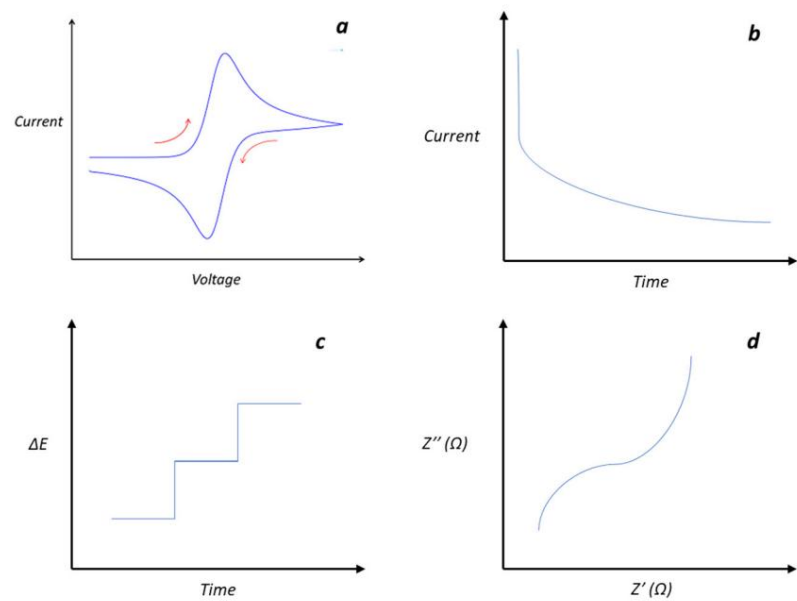


Figure 3. Réponses des principes des électrodes chimiques utilisées dans la caractérisation des matériaux (a) voltamétrie cyclique, (b) chronoampérométrie, (c) potentiométrie et (d) spectroscopie d'impédance.

Les microélectrodes à cavité (CME) sont utilisées dans divers domaines de la recherche scientifique [100], notamment l'électrophysiologie, les neurosciences, la chimie analytique des matériaux [101,102] et même les batteries [103]. Ils sont généralement constitués d'un matériau conducteur, souvent métallique, avec une petite cavité à son extrémité (profondeur de plusieurs dizaines de μm et plus). Ces microélectrodes sont utilisées pour

Les microélectrodes à cavité (CME) sont utilisées dans divers domaines de la recherche scientifique [100], notamment l'électrophysiologie, les neurosciences, la chimie analytique des matériaux [101,102] et même les batteries [103]. Ils sont généralement constitués d'un matériau conducteur, souvent métallique, avec une petite cavité à son extrémité (profondeur de plusieurs dizaines de μm et plus). Ces microélectrodes sont utilisées pour mesurer des signaux électriques à très petite échelle. La cavité à l'extrémité de l'électrode permet une meilleure conduction électrique entre l'électrode et le milieu en

dans lequel il est inséré. Cette fonctionnalité améliore la sensibilité des mesures électrophysiologiques ou électrochimiques. Lorsqu'il s'agit de batteries, les microélectrodes à cavité sont utilisées pour étudier les processus électrochimiques qui se produisent à l'intérieur de la batterie. Ils permettent de mesurer précisément les courants électriques et les potentiels électrochimiques à des échelles très fines, contribuant ainsi à la compréhension des performances et de la durabilité des batteries. Les microélectrodes à cavité dans le domaine des batteries se caractérisent par leur petite taille, leur densité énergétique élevée, leur réponse rapide, leur stabilité et leur durabilité, ainsi que par leur capacité à permettre un contrôle précis des processus électrochimiques. Ils offrent le potentiel de nouvelles architectures de batteries pouvant conduire à des performances améliorées et à une meilleure efficacité énergétique. Les microélectrodes à cavité (CME) constituent une plate-forme précieuse pour évaluer les performances électrocatalytiques des matériaux microparticulaires et nanoparticulaires. Les facteurs techniques et les processus physicochimiques affectant la réponse électrochimique des CME doivent être reconnus, en particulier l'accessibilité des espèces rédox à la surface de l'électrocatalyseur. La réponse voltammétrique des microélectrodes à cavité (CME) est explorée en utilisant une approche combinée expérimentale et théorique. Cela comprend un examen comparatif des techniques de voltamétrie cyclique et de voltamétrie à ondes carrées (SWV). Les résultats démontrent une distorsion de réponse capacitive, augmentant avec la surface de la poudre, mais avec une réponse faradique analogue à celle des microdisques intégrés, indiquant que les réactions électrochimiques se produisent principalement sur la première couche de charge en poudre. En outre, il est démontré que le SWV est bien adapté pour discriminer les processus faradiques dans les CME, et des expressions mathématiques précises sont présentées pour le décrire. Ces résultats fournissent des lignes directrices pour la conception et l'analyse des mesures voltamétriques des CME [104].

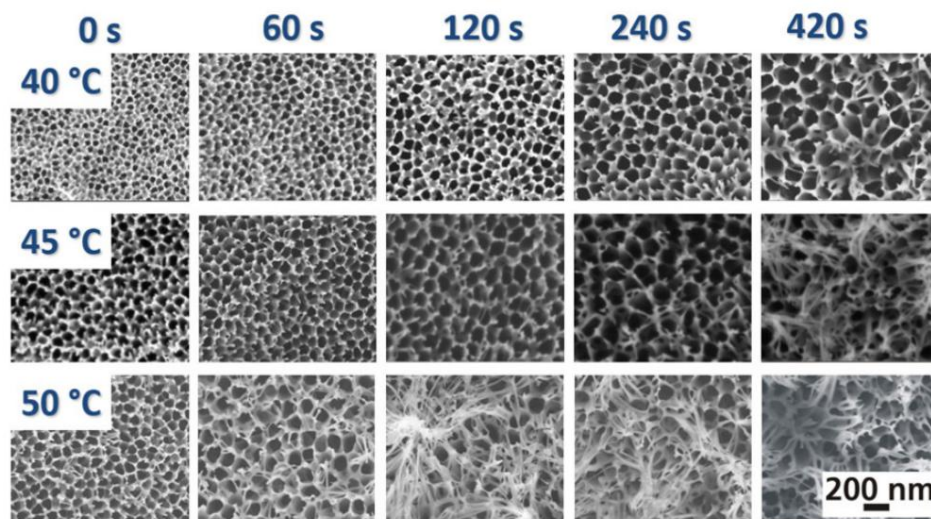
En résumé, bien que la voltamétrie cyclique, la spectroscopie d'impédance, la potentiométrie et la chronoampérométrie soient toutes des techniques électrochimiques utilisées dans la recherche sur les batteries, elles ont chacune des principes, des applications, des avantages et des limites distincts. Le choix de la technique dépend des aspects spécifiques du comportement de la batterie étudié et du niveau de détail et de complexité souhaité dans l'analyse.

2.3. Modification de surface

La modification de surface par des méthodes électrochimiques prend diverses formes à travers différents processus, tels que la galvanoplastie, l'électrodéposition, l'anodisation, la gravure de surface et la fonctionnalisation électrochimique. Cette section résume brièvement le concept de chacun des processus cités ci-dessus et se concentre sur les principales applications liées à chaque méthode.

Les procédés de galvanoplastie et d'électrodéposition sont parfois utilisés de manière interchangeable. Cependant, dans des contextes techniques, ils font référence à des processus différents. La galvanoplastie fait référence au processus de dépôt d'une fine couche de métal sur la surface d'un substrat à l'aide d'une réaction électrochimique [16,105]. Il est largement utilisé dans les industries métallurgiques, telles que la fabrication automobile, électronique et de bijoux (par exemple, revêtements de nickel, revêtements de platine [106], revêtements d'or [107], revêtements de cuivre [108], etc.), dans le but de produire des revêtements de protection pour préserver les surfaces des conditions agressives, augmentant ainsi les performances des matériaux et améliorant les propriétés physiques des composants (brillance, forme, etc.). À l'inverse, l'électrodéposition fait référence au processus de dépôt de tout matériau sur la surface d'un substrat à l'aide de méthodes électrochimiques. L'électrodéposition permet la production de produits de haute qualité avec des propriétés matérielles améliorées et une durabilité élevée. Il permet d'effectuer l'électrodéposition d'alliages, de composites ou de matériaux non métalliques (par exemple, dépôt de verres [109], de silicone [110] et de polymères conducteurs comme le polypyr-

Néanmoins, derrière ces avantages, il en est aussi qui sont à considérer. L'application d'un revêtement par électrolyse implique l'application d'un courant électrique, ce qui entraîne une consommation d'énergie. De plus, la technique nécessite l'utilisation d'un électrolyte, qui peut être corrosif et dangereux pour l'environnement. Enfin, la technique est limitée à des substrats conducteurs, ce qui exclut les matériaux non conducteurs [115]. Cette technique consiste à appliquer un potentiel électrique positif à la surface du substrat dans une solution électrolytique, la réduction d'un potentiel de l'oxyde de l'oxyde [116]. [117], [118], [119]. La principale limitation est la solubilité des sels de l'oxyde de l'oxyde, qui peut former une couche de passivation sur la surface du substrat, ce qui empêche la réduction de l'oxyde. Cependant, les avantages (coût réduit, simplicité, amélioration des propriétés de surface) l'emportent sur les inconvénients (consommation d'énergie, utilisation d'électrolyte, limitation à des substrats conducteurs) [118, 119] (Figure 4).



L'application répandue de la gravure électrochimique concerne la préparation de matières premières **matériaux (composants d'anode et de cathode) utilisés dans la fabrication de ca-**

pacitors, également appelés supercondensateurs [129]. Dans ce procédé, les feuilles d'aluminium (haute pureté $\geq 99\%$) sont traitées par gravure électrochimique puis formées. En fonction des mesures de capacité, les feuilles peuvent être classées et utilisées pour différentes applications, par exemple, haute tension de condensateur CC, démarrage de moteur de condensateur CA, etc. Les valeurs de capacité plus élevées peuvent indiquer certaines propriétés souhaitables, telles qu'une surface accrue ou une électrode améliorée. performances [130]. Par conséquent, ils doivent être interprétés en conjonction avec d'autres techniques de caractérisation et mesures de performance pour évaluer avec précision la qualité globale de la feuille.

2.4. Électroanalyse

L'analyse électrochimique (ou électroanalyse) repose sur l'utilisation de méthodes électrochimiques pour déterminer quantitativement la concentration d'un analyte dans un échantillon. Typiquement, ces méthodes comprennent la voltamétrie [27], l'ampérométrie [28], la potentiométrie [29] et la spectroscopie d'impédance [131] (le principe de ces méthodes est détaillé au § 2.2). Ces méthodes sont utilisées pour mesurer l'activité antioxydante [21,22] et analyser [24], et caractériser divers composés et matériaux [25,26], ainsi que pour développer des méthodes de référence [132].

Les capteurs électrochimiques et les biocapteurs comptent parmi les applications les plus courantes de l'électroanalyse. Ils sont utilisés pour la détection de biomolécules [30,133], de polluants [31] et d'analytes dans des échantillons environnementaux [32,33], des aliments [134], des produits pharmaceutiques [34,35] et des diagnostics cliniques et biochimiques [23,36,135]. Ces appareils offrent des mesures rapides, sensibles et relativement sélectives, ce qui en fait des outils précieux pour la recherche, le contrôle qualité et la surveillance des processus en temps réel (Figure 5).

Dans cette section, deux exemples d'électroanalyse sont étudiés en fonction de leur importance et de leurs applications répandues : l'électrode de pH et le biocapteur de glucose. En fait, la surveillance du pH présente un grand intérêt dans de nombreux processus chimiques et biochimiques. Le terme pH désigne le potentiel de l'hydrogène et lui permet d'exprimer sa puissance. Les mesures de pH expriment l'acidité et l'alcalinité des solutions et des vapeurs et aident au contrôle et à l'optimisation des processus industriels. La mesure du pH à l'aide d'une sonde à électrode redox consiste à déterminer potentiométriquement la concentration en ions hydrogène (H^+) dans une solution basée sur l'équation de Nernst [136,137]. Récemment, de nombreuses électrodes de pH miniaturisées ont été rapportées dans la littérature. Ces dispositifs sont conçus pour être petits et compacts et sont essentiellement importants dans de nombreuses applications qui nécessitent des systèmes à petite échelle pour l'intégration (par exemple, les systèmes de laboratoire sur puce [23, 30], les diagnostics sur le lieu d'intervention, etc.) ou dédiés aux appareils portables (pour la surveillance physiologique ou les trackers de santé portables) [138,139].

Un biocapteur de glucose est un dispositif qui intègre un élément de reconnaissance biologique comme composant de détection (enzymes, par exemple la glucose oxydase (GOx) ou la glucose déshydrogénase (GDH) et son cofacteur). Les sous-produits de la réaction enzymatique diffusent à travers la membrane de détection et sont ensuite oxydés ou réduits à la surface de l'électrode à un potentiel fixe qui dépend du matériau de l'électrode [140, 141]. Typiquement, dans le cas des biocapteurs enzymatiques de glucose de première génération, l'oxydation enzymatique du glucose par GOx conduit à la production de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), qui est oxydé à un potentiel positif de +0,7 V par rapport à une électrode de référence Ag/AgCl. ou réduit aux potentiels négatifs (entre -0,2 et 0 V) à l'aide de médiateurs qui abaissent les potentiels de détection et évitent les problèmes d'interférence. Les biocapteurs de glucose sont des dispositifs couramment utilisés pour surveiller la glycémie chez les patients diabétiques et représentent l'une des applications les plus largement utilisées pour la surveillance de la glycémie dans le monde [143].

production de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), qui est oxydé à un potentiel positif de +0,7 V par rapport à une électrode de référence Ag/AgCl ou réduit à des potentiels négatifs (entre -0,2 et 0 V) à l'aide de médiateurs qui abaissent les potentiels de détection et empêchent les interférences problèmes [142]. Les biocapteurs de glucose sont des dispositifs couramment utilisés pour surveiller la glycémie chez les patients diabétiques et représentent l'une des applications les plus largement utilisées pour la surveillance de la glycémie dans le monde (143).

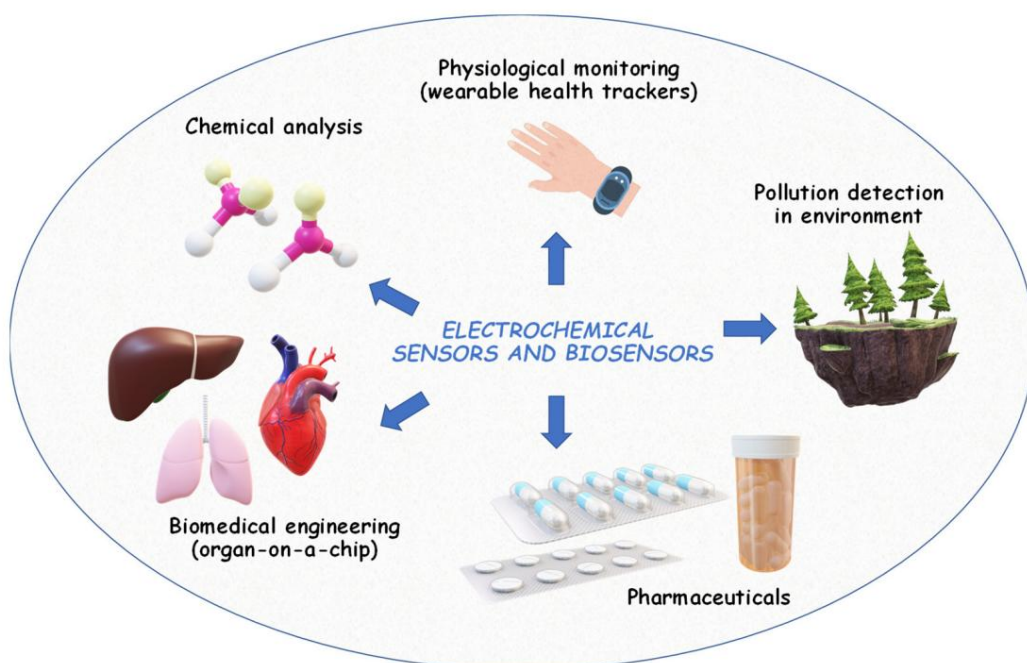


Figure 5. Applications courantes de l'électroanalyse utilisée pour la détection de biomolécules, de polluants, Figure 5. Applications courantes de l'électroanalyse utilisée pour la détection de biomolécules, de polluants, et des analytes dans des échantillons environnementaux, des produits pharmaceutiques et des diagnostics cliniques et biochimiques.

2.5. Procédés électrochimiques de dépollution et d'assainissement des eaux

Fournir de l'eau propre à des fins industrielles ou potables est un défi en raison de la large gamme de produits chimiques générés et utilisés sur une base régulière et continue [144]. D'énormes flux de polluants et de produits chimiques industriels sont générés par ces processus et affectent l'environnement et la qualité de l'eau. En fait, il est bien connu que les plus grands pollueurs sont les fabricants de produits chimiques organiques synthétiques (~400 millions de tonnes par an), l'utilisation d'engrais (~200 millions de tonnes par an) et de pesticides (pesticides ~10 millions de tonnes par an) [145]. La gestion de la pollution de l'eau reste plus importante que jamais, et on a estimé que plus de 30 % de l'eau douce utilisable sur Terre est utilisée pour les processus industriels, l'énergie production et agriculture.

De nombreuses façons de trouver des solutions plus durables pour les applications de traitement de l'eau sont offertes par les processus électrochimiques [146,147]. Dans la plupart des cas, l'électricité est utilisée comme source principale source d'énergie qui facilite les réactions électrochimiques qui se produisent et les conduit processus. Parmi les procédés électrochimiques de traitement de l'eau bien développés, tels que l'électrocoagulation, l'électroflottation, l'électrodialyse, l'oxydation et la réduction électrochimiques, il existe des procédés émergents qui présentent de bonnes conditions préalables à leur utilisation à l'échelle industrielle applications. Ces processus ont tendance à augmenter le taux d'élimination de la pollution, à éliminer inconvénients et élargir l'applicabilité du traitement de l'eau électrochlorée existant techniques pour améliorer la rentabilité. Les processus électrochimiques émergents et combinés suivants, tels que l'électrodéionisation [148], la désionisation capacitive [149], électro-Fenton [150], traitement microbien des piles à combustible [151], photo- et sonoélectrocatalyses, montrent des résultats impressionnants en matière de dépollution de l'eau, notamment à l'échelle du laboratoire [152]. Cependant, la principale préoccupation dans l'utilisation de ces procédés reste la mise à l'échelle industrielle ce qui constitue une étape très difficile pour appliquer ces processus.

L'électrodéionisation est une combinaison de deux procédés de dessalement, l'électrodialyse et échange d'ions, qui entraînent des taux de déminéralisation encore plus profonds. Déionisation capacitive permet le dessalement simultané de l'eau et la récupération de l'énergie électrique, de manière manière efficace. Electro-Fenton permet la génération de catalyseurs in situ, réduisant ainsi formation de boues. En plus du traitement de l'eau, les piles à combustible microbiennes permettent l'électricité l'énergie à récupérer, réduisant ainsi les coûts de maintenance nécessaires à ce processus. La séparation accrue des porteurs de charge et suppression de la recombinaison électron-trou

dans un champ électrique, la photoélectrocatalyse offre de meilleures efficacités d'élimination qu'un seul photocatalyseur. La sonoélectrocatalyse augmente la vitesse à laquelle les substances réactives sont transférées, inhibe la polarisation des électrodes et joue un rôle important dans la production de radicaux hydroxyles pour améliorer l'efficacité du traitement par rapport à l'oxydation d'un seul électrolyte.

Le secteur textile est un exemple d'industrie la plus ancienne avec des processus complexes et une forte consommation de produits chimiques. En raison de la demande toujours croissante de vêtements de la part de la population mondiale et des changements dans l'industrie de la mode, ceux-ci continuent de croître en variété et en nombre [153]. Cela peut contribuer au bénéfice économique de la population, mais l'impact négatif sur l'environnement est souvent signalé, notamment en raison du rejet des eaux usées [154]. En raison de leur toxicité potentielle et des risques pour la santé humaine, les eaux usées textiles sont préoccupantes et doivent être traitées avant d'être rejetées dans l'approvisionnement en

Dans le traitement des déchets textiles, les procédés conventionnels sont les plus appliqués, comme l'intégration de méthodes chimiques, biologiques ou physiques. Le sulfate d'aluminium, le sulfate ferreux et le PAC (chlorure de polyaluminium) sont généralement utilisés comme coagulants dans le traitement des eaux usées textiles [155]. Ces coagulants s'agglomèrent facilement avec les polluants et forment de minuscules particules et floculants dans les eaux usées. Les floculants, à leur tour, améliorent la taille et les propriétés du floc, en particulier sa stabilité [156]. Cependant, pour les eaux usées de colorants, ce procédé a un taux d'élimination de la DCO (demande chimique en oxygène) limité à 10 %, ce qui peut conduire à une production de boues. Pour améliorer les performances du traitement, des boues activées, des bioréacteurs mobiles (MBR) et des biofiltres sont généralement utilisés après coagulation-floculation. Cependant, la qualité des effluents ne répond souvent pas aux normes de qualité requises. Il nécessite donc un processus de finition (sédimentation). Des processus physiques, tels que l'adsorption, sont signalés pour leur application potentielle en tant que traitement de finition. Cependant, sa durée de vie est relativement courte (moins durable) et peut produire des adsorbants usés comme sous-produit. L'intégration de processus chimiques, biologiques et physiques nécessite généralement plus d'espace, un temps de rétention plus long (1 à 4 jours), des coûts opérationnels plus élevés et nécessite un système de traitement et d'élimination des boues. En tant que technologie autonome ou combinée à des procédés aérobies, les procédés biologiques sont souvent utilisés. Un système intégré de processus anaérobies et aérobies est devenu une option en raison des grandes quantités de boues générées par les processus chimiques [153]. L'efficacité d'élimination des couleurs obtenue dans ce procédé est, en revanche, relativement faible. De plus, la teneur élevée en ammonium, la couleur et les DCO non dégradables sont des caractéristiques des eaux usées d'impression textile. Comme étape finale pour éliminer les polluants persistants, y compris les colorants, et améliorer les performances des stations d'épuration biologiques des eaux usées, la plupart des industries textiles utilisent un agent de décoloration (DCA) [157]. Le DCA est un polymère organique cationique avec une base de résine de dicyandiamide formaldéhyde avec une efficacité d'adsorption et une décantabilité élevées, la capacité de neutraliser la charge électrique de la surface des particules, des floccs plus stables et la capacité d'éliminer les colorants dissous, tels que les colorants directs, réactifs, dispersés, et les colorants acides. Cependant, le DCA n'est souvent pas la solution appropriée dans toutes les situations en raison de son coût élevé, de sa faible disponibilité et de la nécessité d'éliminer les boues. Il convient également de noter que les boues produites comme sous-produit dans ce cas peuvent avoir des impacts environnementaux importants et présenter un risque élevé pour les humains et l'écosystème.

Au cours de la dernière décennie, des recherches intensives ont été menées sur l'élimination de la couleur dans les processus d'oxydation modernes. Il peut être créé par des photocatalyseurs [159], l'ozonation, le réactif de Fenton [160] et des processus électrocatalytiques [161]. Les avantages évidents de l'oxydation photocatalytique sont les faibles exigences de température et de pression et le fait qu'elle soit biologiquement inerte et soluble dans l'eau, qui est largement disponible, hautement photoactive, moins toxique et respectueuse de l'environnement. Cependant, des limitations majeures subsistent en termes de potentiel d'application en ce qui concerne la morphologie et la cristallinité du catalyseur TiO_2 , les exigences en matière de dopage métallique, la sélectivité élevée quant au caractère spécifique des polluants et le contact étroit avec les sources lumineuses.

L'oxydation électrocatalytique, communément appelée EAOP (procédé électrochimique avancé d'oxydation), utilise l'énergie électrique pour la dégradation des polluants. Ces procédés reposent sur la formation in situ de radicaux hydroxyles ($\text{OH}^\bullet$) connus pour attaquer et oxyder de manière non sélective les polluants jusqu'à l'obtention de la biodégradabilité ou de la minéralisation totale du milieu.

effluent. Ses performances élevées en matière d'élimination de la couleur et de la DCO ont été rapportées dans les eaux usées de teinture de textiles et dans les eaux usées d'impression de textiles [162]. Un nouveau système électrochimique et un nouveau réacteur hybride Fenton sont proposés comme option de post-traitement efficace pour les effluents textiles et bien d'autres [10,163]. En termes d'élimination de la couleur, de la DCO et de l'ammonium, ce procédé est très efficace. Comme ils sont moins chers que le TiPtIr et plus économiquement réalisables que le carbone GDL (couche de diffusion de gaz) [164], des tiges de TiRuO₂ maille et de carbone graphite ont été utilisées comme électrodes.

Appliqué dans le secteur industriel, un système unique avec un réacteur cylindrique en acier inoxydable avec des paires d'électrodes (cylindre à mailles Ti/RuO₂/anode et cathode en tige de carbone graphite) peut être proposé pour dégrader les polluants complexes des véritables eaux usées textiles. Le système de circulation interne offre des avantages considérables pour le fonctionnement de ce système, par exemple une augmentation des charges volumiques jusqu'à 400 %. Cette méthode peut être une alternative prometteuse pour les eaux usées textiles après traitement, car les polluants se dégradent simultanément par oxydation électro-Fenton. En peu de temps, l'élimination de la couleur, de la DCO et de l'ammonium a été significative. En raison du contact plus long entre les espèces réactives générées et les polluants présents dans les eaux usées, le système à circulation était plus avantageux que le système sans circulation. L'efficacité d'élimination des polluants, la couleur et la DCO, l'indice d'oxydabilité et les coûts opérationnels ont confirmé et soutenu cette technique. La consommation électrique était d'environ 3 kWh/m³ de Rp 4,200/m³ pour le système sans circulation, et elle a été considérablement réduite à 1,1 kWh/m³ ou Rp1,540/m³ pour le système avec circulation. Un système à haut potentiel peut être trouvé dans l'électrochimie hybride Fenton, et il est possible de l'étudier grâce à un réacteur à grande échelle avec intégration directe dans une unité textile anaérobie-aérobie existante [165].

Enfin, diverses techniques de traitement, telles que l'assainissement biologique, le traitement physico-chimique et les techniques électrochimiques telles que la réduction électrochimique/ électrocatalytique, l'oxydation et l'électrocoagulation, seront nécessaires en raison de la diversité et de la complexité des polluants chimiques de l'eau. Le recours au traitement électrocatalytique de l'eau contaminée est de plus en plus courant en raison de la baisse du coût des sources d'énergie renouvelables et du besoin croissant de transformer les substances nocives en composés inoffensifs ou bénéfiques. Alors que la réduction électrocatalytique peut traiter des flux contenant des espèces oxydées comme les nitrates et les nitrites produits par le ruissellement des engrais, l'oxydation électrocatalytique peut traiter une variété de flux de déchets industriels, notamment les effluents textiles et alimentaires. En raison de ces avantages et de leur adéquation à petite échelle, les procédés électrocatalytiques sont parfaits pour le traitement décentralisé de l'eau. L'électrocatalyse a le potentiel d'avoir un impact durable sur la conversion des polluants nocifs de l'eau en substances précieuses ou inoffensives grâce à la disponibilité croissante d'électricité bon marché provenant de sources renouvelables.

2.6. Électrosynthèse La

synthèse organique électrochimique (ou électrosynthèse) est aujourd'hui devenue un outil pour synthétiser de nouveaux composés via la chimie verte [166]. Ils peuvent fonctionner à température et pression ambiantes et ne nécessitent généralement pas de produits chimiques auxiliaires. Généralement, le processus d'électrosynthèse repose sur l'utilisation d'un réacteur électrochimique alimenté par une source d'énergie [167].

Deux paramètres sont clés pour obtenir une haute efficacité d'électrosynthèse. Premièrement, la conception du réacteur est cruciale pour obtenir un rendement de production élevé. Deuxièmement, les caractéristiques des électrodes (matériau, nombre, taille, géométrie et surface) sont une considération essentielle pour la quantité de composés électrogénérés, puisque les électrodes sont le site hébergeant les réactions électrochimiques [168].

Alternativement, l'utilisation du courant électrique à travers une réaction pour activer des molécules organiques au moyen de l'ajout ou de la suppression d'électrons présente plusieurs avantages, tels que la simplicité et la grande sélectivité des réactions et la disponibilité des matériaux synthétiques (faible coût, simplicité d'utilisation). , sans aiguille pour une méthode de séparation, etc.). De plus, l'électrosynthèse peut être modulaire et évolutive, permettant une flexibilité dans la capacité de production [169]. Des méthodologies d'électrooxydation et d'électrosynthèse ont été développées pour la fonctionnalisation sélective de molécules organiques, y compris l'activation CH, la liaison CC

formation et synthèse asymétrique. Ce domaine est important dans de nombreux processus industriels majeurs tels que la génération de chlore [170], la fabrication d'aluminium [171], la production d'engrais décarbonisés à base d'azote [172], la synthèse de médicaments [173] et bien d'autres [174].

Cette partie présente quelques exemples traitant de la synthèse de nouvelles molécules organiques par voies électrochimiques. Le premier exemple porte sur la synthèse d'engrais à base d'azote (NBF) par des méthodes électrochimiques. La synthèse des NBF, tels que l'ammoniac et l'urée, a été réalisée avec succès en utilisant des déchets, tels que le dioxyde de carbone et les nitrates [175]. Les travaux se sont largement concentrés sur la compréhension des sites catalytiquement actifs pour l'électrosynthèse de l'urée. En fait, la sélectivité et la dépendance de l'activité sur la composition relative du catalyseur d'oxyde de cuivre et de zinc ont été trouvées et attribuées à un effet électronique synergique. D'autre part, des nanomatériaux amorphes ont été utilisés comme catalyseurs, la réaction impliquant la synthèse électrochimique de composés contenant de l'azote à partir d'une variété de petites molécules contenant de l'azote en abondance (N_2 , NO, NO_3^- – etc. . .). Les résultats montrent que ces matériaux peuvent simplifier (casser) la liaison de couplage CN, conduisant à la synthèse d'urée [176].

Concrètement, la production d'engrais décarbonisés à base d'azote (NBF) a été développée par les technologies CASFER en associant la nanotechnologie et la science électrochimique. En fait, ils ont pu développer des NBF précis, de type commercial, à partir de flux de déchets. Ils ont utilisé une approche de synthèse organique (OSA) pour produire des NBF, avec des ingrédients prévisibles et fiables conçus pour stimuler la croissance des plantes [177].

De plus, l'électrolyse chlore-alcali est l'un des procédés les plus anciens et les plus mis en œuvre et possède les applications les plus importantes de l'électrochimie dans l'industrie. Ce procédé consiste à produire du chlore et de l'hydroxyde de sodium (NaOH), qui sont des produits chimiques de base nécessaires à l'industrie. Ici, l'électrolyse a été identifiée comme une méthode verte de transfert moléculaire. Les électrons dans ces réactions électrochimiques ne génèrent aucun déchet lorsqu'ils sont générés par l'énergie solaire et le vent.

L'importance de l'électrosynthèse a également été mise en œuvre pour la fonctionnalisation des molécules de manière durable, en minimisant l'utilisation de réactifs et de sous-produits toxiques. Ceci est mis en œuvre par la difonctionnalisation des alcènes, la synthèse hétérocyclique stéréosélective et la réaction de carboxylation [178].

De plus, une étude très récente de Talebi and co. ont décrit la synthèse électrochimique de dérivés sulfamides connus parmi les antibiotiques les plus utilisés au monde [179]. Les conditions d'électrosynthèse et les voies réactionnelles ont été étudiées. Les valeurs optimales des paramètres opératoires (pH, solvant, électrodes...) ont été évaluées. En optimisant les conditions, le contrôle cinétique et thermodynamique de la réaction à l'aide du potentiel de l'électrode s'est révélé prometteur (Figure 6). En effet, cette méthode a pu montrer la sélectivité pour oxyder ou réduire un composé donné, empêchant ainsi l'oxydation /réduction des intermédiaires. Cette méthode électrochimique de synthèse des sulfamides par rapport aux méthodes classiques présente de nombreux avantages : - Permet l'utilisation d'oxydants verts, ce qui réduit l'utilisation de composés/solvants toxiques et prévient les

risques environnementaux ; - S'appuyer sur l'électrification comme source d'énergie, ce qui diminue la quantité et le coût de l'énergie consommée ; - Empêcher l'utilisation de catalyseurs supplémentaires ; - Miser sur une configuration moins compliquée pour la simplicité de la procédure technique.

Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) peut également être synthétisé par électrochimie. En fait, la réaction cathodique de réduction de l'oxygène (ORR) à deux électrons ($2e^-$) réalise l'électrosynthèse de H_2O_2 . Cette réaction se produit généralement dans des conditions alcalines et nécessite un catalyseur approprié pour améliorer l'efficacité du procédé. Différents catalyseurs, notamment des complexes métalliques et des oxydes métalliques, ont été étudiés à cette fin. Certaines études montrent l'importance d'un électrocatalyseur à base de motifs Fe libres pour la synthèse du peroxyde d'hydrogène. Cette utilisation de Fe isolé a conduit à une activité, une sélectivité et une stabilité élevées en raison de l'énergie de liaison élevée avec les intermédiaires pour briser la liaison peroxyde en H_2O [181].

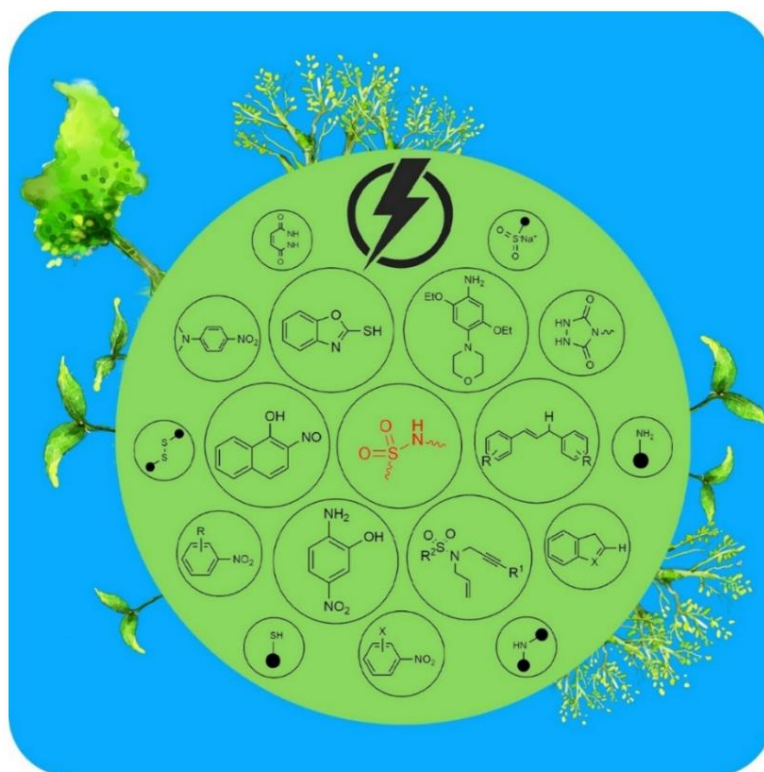


Figure 6. Synthèse électrochimique de dérivés sulfamides par voie électrochimique (Creative Commons CC sous licence) [179].

En fait, en conclusion, la synthèse électrochimique s'avère désormais être une voie prometteuse pour la réaction cathodique de réduction de l'oxygène (ORR) à deux électrons ($2e^-$) conduisant à l'électrosynthèse de H_2O_2 . Cette réaction se produit généralement dans des conditions alcalines et nécessite une combinaison de pontons générée par la méthode classique de synthèse chimique. Divers catalyseurs, dont métalliques et des oxydes métalliques ont été étudiés à cet effet. Certaines études montrent l'importance d'un électrocatalyseur à base de motifs Fe libres pour la synthèse du peroxyde d'hydrogène. Cette utilisation de Fe isolé a conduit à une activité, une sélectivité et une stabilité élevées en raison qu'il contient des sites de coordination pour maintenir la prévention contre la perte de la structure par [189]. L'absence des intermédiaires pour briser la liaison peroxyde H_2O_2 [181] la réaction laboussure, et sous-marin. Dans cette partie, nous discuterons de la protection électrochimique contre la corrosion des métaux pour éviter corrosion dans les plates-formes gazières offshore et les canalisations métalliques sous-marines [183,184].

La protection électrochimique contre la corrosion des métaux est la méthode la plus appropriée utilisée et comprend des protections anodiques et cathodiques. Les deux méthodes reposent sur la manipulation du réactions électrochimiques à la surface du métal pour prévenir la corrosion et prolonger la durée de vie des structures en acier dans des environnements marins difficiles [185].

Le système de protection anodique (AP) maintient la surface dans un état activement oxydant. État. Cette méthode consiste à appliquer un courant électrique externe au métal, ce qui rend c'est l'anode dans une cellule électrochimique, qui polarise la surface à un point plus positif potentiel, inhibant et prévenant ainsi les réactions de corrosion [186,187]. Autrement pour appliquer cette méthode, il faut fixer des anodes sacrificielles constituées de métaux plus réactifs qui ont des potentiels électriques plus élevés, comme le zinc ou le magnésium, par rapport à la structure métallique. Les anodes sacrificielles se corrodent préférentiellement, protégeant la structure de la corrosion en se sacrifier. Dans certains systèmes, pour maximiser le niveau de protection, les deux sens peuvent être utilisés ensemble [188].

Les systèmes de protection cathodique (CP) sont une autre méthode importante pour réduire ou arrêter la corrosion des structures métalliques en abaissant le potentiel métallique à l'aide d'un courant cathodique alimenté par un système anodique [189, 190]. Deux principaux types de systèmes CP sont largement utilisés : protection cathodique anodique sacrificielle (SACP) et protection cathodique à courant imposé (PICC). La protection cathodique anodique sacrificielle (SACP) est principalement utilisée pour les petits projets offshore.

structures ou emplacements présentant des taux de corrosion faibles à modérés. Dans les systèmes SACP, la structure à protéger devient la cathode d'une cellule électrochimique, tandis que des anodes sacrificielles constituées de métaux plus réactifs, comme le zinc ou l'aluminium, sont fixées aux monopieux en acier [191]. Ces anodes sacrificielles se corrodent préférentiellement, se sacrifiant efficacement pour protéger la structure en acier en fournissant une source d'électrons qui supprime l'oxydation de l'acier. En conséquence, les anodes sacrificielles doivent être remplacées périodiquement au fur et à mesure de leur consommation. Cependant, les systèmes ICCP sont utilisés dans des structures offshore plus grandes ou situés dans des zones présentant des taux de corrosion élevés. En fait, des anodes inertes composées d'oxydes métalliques mixtes ou de titane plaqué sont connectées à une source d'alimentation externe [192]. Cette source d'énergie applique un courant électrique contrôlé à la structure en acier, créant un potentiel cathodique protecteur qui supprime la corrosion [193]. Les systèmes ICCP offrent un contrôle précis du processus de protection cathodique.

2.8. Outils de modélisation électrochimique Le

domaine de la modélisation électrochimique a connu des progrès continus grâce à l'amélioration des techniques informatiques, des outils logiciels et des méthodologies. Des exemples incluent COMSOL MULTIPHYSICS [194], MATLAB avec Simulink [195], Battery Design Studio [196], Canton, DigiElch [197,198], Python [199] et d'autres. Ces avancées sont cruciales pour le développement de batteries, de capteurs et biocapteurs, de piles à combustible et de nombreuses autres applications électrochimiques [200]. Ces dernières années, la modélisation électrochimique a connu une demande croissante et est devenue un outil puissant pour les chercheurs et les scientifiques.

En fait, cela permet de comprendre des systèmes complexes et aide à la prédiction et à l'optimisation de dispositifs électrochimiques dans diverses conditions, ce qui réduit le temps et le coût de l'étude (Figure 7). De plus, la modélisation électrochimique permet le prototypage virtuel de dispositifs et de systèmes, permettant aux ingénieurs de simuler les performances, de résoudre les problèmes potentiels et d'itérer les conceptions avant la fabrication physique [201,202]. Récemment, afin de réduire les tests sur les animaux, il est devenu obligatoire de modéliser des dispositifs (bio)médicaux (y compris des dispositifs bioélectrochimiques) pour obtenir l'approbation de la Food and Drug Administration (FDA), ce qui souligne, une fois de plus, l'importance de la modélisation électrochimique [203-205].

Dans cette partie, nous donnerons quelques exemples de recherches récentes impliquant la modélisation électrochimique divisées par domaine d'application. Dans le domaine de l'électrochimie organique, Sigman et al. mis en œuvre des outils de modélisation statistique pour la conception de molécules organiques redox-actives destinées à être utilisées comme électrolytes dans des batteries à flux redox non aqueuses [206]. Dans le domaine des réacteurs électrochimiques, la modélisation et la simulation des réacteurs électrochimiques (ECR) par les techniques de dynamique des fluides computationnelle (CFD) ont revêtu une importance cruciale en raison de leurs principales applications : électrosynthèse de produits chimiques et de médicaments, extraction électrolytique de métaux, chlore-alcali, batteries à flux redox, traitement de l'eau et piles à combustible [207]. Dans le domaine du nanoconfinement, Long et al. ont étudié trois techniques nano-électrochimiques impliquant la modélisation pour étudier la chimie multiphasique sous nanoconfinement : l'électrochimie par collision stochastique, l'électrochimie à nanogouttelette unique et l'électrochimie à nanopores [208]. Dans le domaine de la production d'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM), un outil de modélisation basé sur le logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD), ANSYS/Fluent a été utilisé [209]. Dans le domaine des piles à combustible, qui constituent une source prometteuse d'énergie propre, COMSOL Multiphysics a été utilisé pour incorporer une série de phénomènes physiques afin de simuler les performances des piles à combustible à oxyde solide (SOFC) [210]. Dans une autre étude, une simulation numérique d'un modèle tridimensionnel avec un seul canal d'écoulement a été construite. Il fournit une base scientifique pour la stratégie de contrôle et la conception structurelle des SOFC [211]. Dans le domaine des batteries, une étude montre comment l'implémentation actuelle du modèle Doyle dans COMSOL dans les électrodes des batteries Li-ion peut améliorer la dynamique électrochimique de ces batteries [212].



électrochimie divisées par domaine d'application. Dans le domaine de l'électrochimie organique, la modélisation Sigman a également été utilisée pour faire progresser de nombreuses autres applications électrochimiques : et coll. mis en œuvre des outils de modélisation statistique pour la conception de cellules thermoélectrochimiques à molécules organiques redox-actives, le modèle TEC Multiphysics est construit pour fournir une modélisation pour l'application comme électrolytes dans les batteries à flux redox non aqueuses [206]. Dans une compréhension plus approfondie des interactions entre le transport de chaleur/de masse et le domaine électrochimique des réacteurs électrochimiques, la modélisation et la simulation des réacteurs électrochimiques calment les réactions, dans le but de convertir la chaleur résiduelle en électricité [213, 214]. Dans les gaz (ECR), les techniques de dynamique des fluides informatiques (CFD) ont été des électrodes d'im- diffusion cruciales, la modélisation et l'investigation numérique ont été utilisées dans la performance. L'importance en raison de leurs principales applications : électrosynthèse de produits chimiques et de médicaments, élec- de la réduction électrochimique du dioxyde de carbone en méthanol. Un modèle a été construit pour étudier les métaux, le chlore-alcali, les batteries à flux redox, le traitement de l'eau et les piles à combustible, et évaluer le rôle des électrodes à diffusion gazeuse, à base de Cu₂O-/ZnO dans l'amélioration de la réduction [207]. Dans le domaine du nanoconfinement, Long et al. a étudié trois technologies nano électrochimiques consistant à transformer le dioxyde de carbone en méthanol à l'intérieur d'une cellule électrochimique. Le modèle a été simulé numériquement impliquant la modélisation pour étudier la chimie multiphasique sous nanoconfinement : sto- à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics et validée à l'aide des résultats expérimentaux [215]. L'électrochimie de collision cascade, électrochimie de nanogouttelettes uniques et nanopores Dans l'usinage électrochimique (ECM), le logiciel COMSOL Multiphysics est utilisé pour optimiser l'usinage électrochimique [208]. Dans le domaine de la production d'hydrogène par échange de protons, de nombreux paramètres [216] sont présents.

L'importance de l'électrochimie dans différents domaines scientifiques et technologiques a conduit à son inclusion dans les programmes éducatifs. L'incorporation de l'électrochimie dans l'éducation a évolué pour être plus interdisciplinaire et aligné sur les avancées scientifiques et technologiques actuelles. Voici deux exemples impliquant l'électrochimie et l'éducation.

Les potentiostats sont essentiels au développement de la recherche en électrochimie, mais leur coût est principal inconvénient de leur utilisation massive. Dans le but de fournir une alternative abordable

Conçu pour les communautés aux ressources limitées, un poste de travail électrochimique portable et peu coûteux intégrant un potentiostat open source basé sur Arduino et une application pour smartphone a été adopté dans l'enseignement supérieur et la recherche. Il peut réaliser les techniques électrochimiques les plus utilisées de voltamétrie et de chronoampérométrie cycliques et linéaires [217].

D'un autre côté, l'électrochimie est difficile à apprendre en raison de ses concepts abstraits impliquant des niveaux de représentation macroscopique, microscopique et symbolique. Des études ont montré que les étudiants peuvent visualiser et améliorer leur compréhension de la chimie en utilisant l'animation et la simulation interactives par ordinateur. Cette étude rend compte de l'effet du module interactif d'animation et de simulation par ordinateur nommé « Électrolyse interactive de solution aqueuse » (IEAS) qui a été développé pour aider les étudiants à apprendre l'électrolyse [218]. Ainsi, on peut conclure que l'IEAS a un impact sur l'amélioration de la compréhension des étudiants du concept d'électrolyse et que les étudiants sont plus motivés pour apprendre l'électrochimie.

Enfin, l'expérimentation pratique avec des cellules électrochimiques, des électrodes, des électrolytes et des appareils de mesure reste le meilleur choix pour offrir aux étudiants une expérience pratique et renforcer les concepts théoriques. Aujourd'hui, de nombreux fabricants peuvent fournir et mettre à disposition des établissements universitaires un « Kit pédagogique ». Celui-ci contient des électrodes, des électrolytes et du matériel pédagogique, permettant aux instructeurs d'intégrer plus facilement l'électrochimie dans leur programme (reportez-vous à la sous-section pour connaître les entreprises susceptibles de fournir ces kits). Ces kits comprennent souvent des expériences avec des procédures claires qui facilitent l'intégration de l'apprentissage de l'électrochimie appliquée dans le système éducatif. Il convient de noter ici que la région MENA est confrontée à un manque d'établissements proposant des programmes d'enseignement supérieur en électrochimie, malgré la disponibilité d'offres académiques diversifiées. Ce déficit est particulièrement préoccupant compte tenu de la demande croissante dans de nombreux secteurs du marché du travail pour des professionnels dotés de connaissances en électrochimie. Alors que les industries reconnaissent de plus en plus l'importance de l'électrochimie dans diverses applications, l'absence d'opportunités de formation pertinentes souligne une lacune critique qui doit être comblée. Dans les années à venir, il sera impératif d'intégrer l'expertise électrochimique dans les programmes éducatifs de la région pour répondre aux demandes changeantes du marché du travail et favoriser l'innovation et la croissance dans les secteurs clés.

2.10. Entreprises électrochimiques

De nombreuses entreprises électrochimiques sont présentes dans le monde entier. Nous en représentons certains selon leurs localisations.

L'industrie électrochimique européenne se caractérise par l'accent mis sur la durabilité et l'économie circulaire, avec des investissements importants dans les énergies propres, la technologie des batteries et les processus de recyclage. Les principaux acteurs et initiatives incluent Northvolt (Stockholm, Suède), Umicore (Bruxelles, Belgique), BASF (Ludwigshafen, Allemagne), ITM Power (Sheffield, Royaume-Uni), SOLVAY (Bruxelles, Belgique), etc. Le secteur électrochimique dans les États-Unis est diversifié et met fortement l'accent sur l'innovation et le développement technologique, en particulier dans les domaines des batteries et des solutions de stockage d'énergie renouvelable. Parmi les principaux acteurs et domaines d'intérêt figurent Tesla Inc. (Texas, États-Unis), 3M (Maplewood, États-Unis), Dow Chemical Company (Michigan, États-Unis), General Electric (Boston, États-Unis), Albemarle Corporation (Caroline du Nord), etc. La participation de la région MENA dans le secteur électrochimique est croissante, en particulier dans les énergies renouvelables et les technologies associées, comme la production d'hydrogène vert. Certains acteurs clés sont ACWA Power (Riyad, Arabie Saoudite), MASDAR (Abu Dhabi, Émirats Arabes Unis), SABIC (Riyad, Arabie Saoudite), OQ (Mascate, Oman), etc.

D'autre part, il existe plusieurs sociétés qui fournissent des instruments et des accessoires pour l'expérimentation électrochimique, comme des potentiostats de type mini et standard (appareils monocanaux ou multicanaux et appareils portables), des électrodes (électrodes classiques à disque rotatif, écrans imprimés, etc.), des cellules électrochimiques, des kits pédagogiques, etc. Les acteurs clés sont Metrohm (Herisau, Suisse), Bio-Logic Sciences instruments (Seyssinet-Pariset, France), PalmSens (Houten, Pays-Bas), Solartron (Bognor Regis, UK), Hanna Instruments (Smithfield, VA, USA), Gamry instruments (Warminster, PA, États-Unis), Sciospec

(Bennewitz, Allemagne), Princeton Applied Research (Bognor Regis, Royaume-Uni), PINE RESEARCH (Durham, Caroline du Nord, États-Unis), Texas Instruments (Dallas, Texas, États-Unis), Kanoplytech (Uttar Pradesh, Inde), Ivium Technologies (Eindhoven, Pays-Bas), Corrtest Instruments (Wuhan, Chine), Xiamen Tob New Energy Technology (ville de Xiamen, Chine), Phadke Instruments (Mum-bai, Inde), etc. (Figure 8). Cette liste n'est pas exhaustive et reflète un instantané d'une évolution rapide domaine en progression (les sites Internet des prestataires sont répertoriés dans le tableau 2).

Tableau 2. Sites Web des fournisseurs d'instruments et d'accessoires électrochimiques.

Liste des fournisseurs de produits électrochimiques Instruments et accessoires	Site Internet du fournisseur
Métrohm	www.metrohm.com , consulté le 16 mai 2024
Instruments des sciences bio-logiques	www.biologique.net , consulté le 16 mai 2024
PalmSens	www.palmsens.com , consulté le 16 mai 2024
Solartron	www.solartronmetrology.com , consulté le 16 mai 2024
Hanna Instruments	www.hannainst.com , consulté le 16 mai 2024
Instruments ludiques	www.gamry.com , consulté le 16 mai 2024
Sciospec	www.sciospec.com , consulté le 16 mai 2024
Recherche appliquée à Princeton	www.ameteksi.com , consulté le 16 mai 2024
RECHERCHE SUR LE PIN	www.ti.com , consulté le 16 mai 2024
Texas Instruments	www.pineresearch.com , consulté le 16 mai 2024
Kanoplytech	www.kanoplytech.com , consulté le 16 mai 2024
Ivium Technologies	www.ivium.com , consulté le 16 mai 2024
Kanoplytech	www.kanoplytech.com , consulté le 16 mai 2024
Instruments les plus performants	www.corrtest.com.cn , consulté le 16 mai 2024
Ivium Technologies	www.ivium.com , consulté le 16 mai 2024
Instruments les plus performants	www.tobmachine.com , consulté le 16 mai 2024
Xiamen Tob Nouvelle technologie	www.phadkeinstruments.com , consulté le 16 mai 2024
Instruments Phadke	www.phadkeinstruments.com , consulté le 16 mai 2024

Récemment, Electrochemistry Consulting and Services (E2CS) (Tripoli, Liban) a été lancé en tant que nouvelle entité émergente dans la région MENA qui fournit des conseils et des services de conseil en électrochimie appliquée et support technique à un large éventail de clients dans le domaine de l'électrochimie appliquée y compris ceux des secteurs de l'énergie, de la fabrication et de la fabrication. Enfin, l'industrie électrochimique connaît une croissance rapide, tirée par les besoins croissants en matière de stockage d'énergie, de purification des transports, et la durabilité et l'économie circulaire des matériaux. L'application des principes d'innovation en science des matériaux à l'avenir des entreprises électrochimiques promet pour les années à venir, cependant, le succès dépendra de la capacité des entreprises à relever les défis émergents e- s'adapter à l'évolution de la dynamique du marché.



Figure 8. Principaux fournisseurs d'instruments et d'accessoires électrochimiques dans le monde.

3. Conclusions

L'électrochimie appliquée joue un rôle important dans l'avancement de la technologie, la promotion de la durabilité et la résolution des défis sociétaux dans divers domaines. Son efficacité et sa fiabilité en font un outil indispensable pour l'innovation, le progrès et la résolution de problèmes dans le monde moderne. Au cours des prochaines années, on s'attend à ce que les élé-

3. Conclusions

L'électrochimie appliquée joue un rôle important dans l'avancement de la technologie, la promotion de la durabilité et la résolution des défis sociétaux dans divers domaines. Sa polyvalence, son efficacité et sa fiabilité en font un outil indispensable pour l'innovation, le progrès et la résolution de problèmes dans le monde moderne. Au cours des prochaines années, on s'attend à ce que l'électrochimie occupe une place solide dans de nombreux secteurs et devienne une science de référence pour de nombreux chercheurs. Cela nécessite une attention particulière pour intégrer l'expertise électrochimique dans les programmes éducatifs du monde entier afin de répondre aux demandes changeantes du marché du travail et de favoriser l'innovation et la croissance dans des secteurs clés. En revanche, l'avenir des entreprises électrochimiques semble encourageant ; cependant, les entreprises doivent s'adapter aux changements du marché et relever efficacement les défis émergents pour suivre l'évolution de la technologie électrochimique.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Conflits d'intérêts : L'auteur Ayman Chmayssem est le fondateur de la société Electrochemistry Consulting & Services (E2CS). Les autres auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

Les références

1. Singh, VG *Électrochimie appliquée* ; Nova Science Publisher Inc. : New York, NY, États-Unis, 2010. [\[CrossRef\]](#)
2. Wragg, AA *Journal d'électrochimie appliquée* ; Springer Nature : Berlin, Allemagne, 2009 ; Tome 39, p. 467. [\[Référence croisée\]](#)
3. Bevan, KH ; Foong, YW ; Shirani, J. ; Yuan, S. ; Abi Farraj, S. Physique appliquée à l'électrochimie : réactions tunnel. *J.Appl. Phys.* 2021, 129, 090901. [\[Réf. croisée\]](#)
4. Duan, J. ; Tang, X. ; Dai, H. ; Yang, Y. ; Wu, W. ; Wei, X. ; Huang, Y. Construire des batteries lithium-ion sûres pour les véhicules électriques : une revue. *Électrochimie. Énergie Rév.* 2020, 3, 1–42. [\[Référence croisée\]](#)
5. Brinkert, K. ; Mandin, P. Fondamentaux et applications futures de la conversion électrochimique de l'énergie dans l'espace. *npj Microgravité* 2022, 8, 52. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
6. Santoro, C. ; Arbizzani, C. ; Érable, B. ; Ieropoulos, I. Piles à combustible microbiennes : des principes fondamentaux aux applications. Une critique. *J.Puissance Sources* 2017, 356, 225-244. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
7. Sazali, N. ; Salleh, WNW ; Jamaludine, AS ; Razali, MNM Nouvelles perspectives sur la technologie des piles à combustible : une brève revue. *Membranes* 2020, 10, 99. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
8. Esposito, *Électrolyseurs sans membrane DV pour la production d'hydrogène à faible coût dans un avenir énergétique renouvelable*. *Joule* 2017, 1, 651-658. [\[Référence croisée\]](#)
9. Abbasi, R. ; Setzler, BP ; Lin, S. ; Wang, J. ; Zhao, Y. ; Xu, H. ; Pivovar, B. ; Tian, B. ; Chen, X. ; Wu, G. ; et coll. Une feuille de route vers l'hydrogène à faible coût avec les électrolyseurs à membrane échangeuse d'hydroxyde. *Av. Maître.* 2019, 31, e1805876. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
10. Chmayssem, A. ; Taha, S. ; Hauchard, D. Réacteur électrochimique à grande échelle avec cathode tridimensionnelle à lit fixe pour procédé Electro-Fenton : Application au traitement du bisphénol A. *Electrochim. Acta* 2017, 225, 435-442. [\[Référence croisée\]](#)
11. Yu, Y. ; Zhong, Y. ; Soleil, W. ; Xie, J. ; Wang, M. ; Guo, Z. Un nouveau processus d'électrocoagulation avec des électrodes centrifuges pour le traitement des eaux usées : comportement électrochimique de l'anode et cinétique de l'élimination des métaux lourds. *Chemosphère* 2023, 310, 136862. [\[Référence croisée\]](#)
12. Tran, savoirs traditionnels ; Chiu, KF ; Lin, CY ; Leu, HJ Traitement électrochimique des eaux usées : sélectivité de l'élimination des métaux lourds Processus. *Int. J. Hydrogène Énergie* 2017, 42, 27741-27748. [\[Référence croisée\]](#)
13. Shrestha, R. ; Interdire, S. ; Devkota, S. ; Sharma, S. ; Joshi, R. ; Tiwari, AP ; Kim, HY ; Joshi, MK Tendances technologiques dans le domaine des métaux lourds Élimination des eaux usées industrielles : un examen. *J. Environ. Chimique. Ing.* 2021, 9, 105688. [\[CrossRef\]](#)
14. Yue, H. ; Xue, L. ; Chen, F. Élimination électrochimique efficace de la contamination par les nitrites avec des électrodes RuO₂-TiO₂/Ti stables. *Appl. Catal. B* 2017, 206, 683-691. [\[Référence croisée\]](#)
15. Dao, KC ; Yang, CC ; Chen, KF ; Tsai, YP Tendances récentes en matière de retrait de produits pharmaceutiques et de produits de soins personnels par électro-Oxydation chimique et systèmes combinés. *Eau* 2020, 12, 1043. [\[CrossRef\]](#)
16. Bhat, RS ; Shetty, SM ; Kumar, NA Galvanoplastie du revêtement en alliage Zn-Ni sur l'acier doux et ses études électrochimiques. *J. Mater. Ing. Effectuer.* 2021, 30, 8188-8195. [\[Référence croisée\]](#)
17. Zhang, H. ; Zhang, N. ; Gilchrist, M. ; Fang, F. Avancées dans le micro/nano-électroformage de précision : une revue de l'état de l'art. *J. Micromécanique. Microeng.* 2020, 30, 103002. [\[Réf. croisée\]](#)
18. Xu, Z. ; Wang, Y. Usinage électrochimique de composants complexes de moteurs aéronautiques : développements, tendances et avancées technologiques. *Menton. J. Aéronaute.* 2019, 34, 28-53. [\[Référence croisée\]](#)
19. Zhang, Y. ; Lan, J. ; Xu, Y. ; Yan, Y. ; Liu, W. ; Liu, X. ; Gu, S. ; Zhou, J. ; Wang, M. Alliage PtCo ultrafin par gravure par pyrolyse confinée Pyrolyse pour une évolution améliorée de l'hydrogène. *J. Colloïde. Interface Sci.* 2024, 660, 997-1009. [\[Référence croisée\]](#)

20. Zhan, Y. ; Zhang, G. ; Shen, J. ; Zhou, B. ; Zhao, C. ; Guo, J. ; Wen, M. ; Tan, Z. ; Zheng, L. ; Lu, J. ; et coll. Alliage électrochimique de surface et gravure faciles de fils Au pour permettre des substrats hautes performances pour une diffusion Raman améliorée en surface. *Nano Mater. Sci.* 2023. [\[Référence croisée\]](#)
21. René, A. ; Abasq, ML; Hauchard, D. ; Hapiot, P. Comment les composés phénoliques réagissent-ils face aux ions superoxydes ? Une méthode électrochimique simple pour évaluer la capacité antioxydante. *Anal. Chimique.* 2010, 82, 8703-8710. [\[Référence croisée\]](#)
22. Keyrouz, R. ; Abasq, ML; Le Bourvellec, C. ; Blanc, N. ; Audibert, L. ; Argall, E. ; Hauchard, D. Contenu phénolique total, piégeage des radicaux et voltamétrie cyclique des algues de Bretagne. *Chimie alimentaire.* 2011, 126, 831-836. [\[Référence croisée\]](#)
23. Chmayssem, A. ; Verplanck, N. ; Boizot, F. ; Alessio, M. ; Santos, L. ; Mourier, V. ; Vignoud, S. ; Navarro, F. ; Mailley, P. Plateforme microfluidique de biocapteurs électrochimiques pour applications d'organes sur puce. Dans *Actes de la MicroTAS 2021 — 25e Conférence internationale sur les systèmes miniaturisés pour la chimie et les sciences de la vie*, Palm Springs, Californie, États-Unis, 10-14 octobre 2021.
24. Chmayssem, A. ; Hauchard, D. Nouvelle méthode de détection des traces d'alkylphénol dans l'eau basée sur un capteur cellulaire électrochimique intégré. *Rév. Sci. l'Eau* 2015, 28, 35-40. [\[Référence croisée\]](#)
25. Hauchard, D. ; Cassir, M. ; Chivot, J. ; Baudry, D. ; Ephritikhine, M. Étude électrochimique des composés organométalliques de l'uranium (IV) et (III) dans le tétrahydrofurane au moyen de microélectrodes et d'ultramicroélectrodes conventionnelles. Deuxième PARTIE. Application aux composés borohydrures-Étude de la stabilité du CP2U(BH₄)₂. *J. Electroanal. Chimique.* 1993, 347, 399-407. [\[Référence croisée\]](#)
26. Terbouche, A. ; Lamèche, S. ; Aït-Ramdane-Terbouche, C. ; Guerniche, D. ; Lerari, D. ; Bachari, K. ; Hauchard, D. Un nouveau capteur électrochimique basé sur un complexe d'électrode en pâte de carbone/Ru (III) pour la détermination des nitrites : mesures d'impédance électrochimique et de voltamétrie cyclique. *Mesure* 2016, 92, 524-533. [\[Référence croisée\]](#)
27. Shin, Kentucky ; Oum, W. ; Yu, DJ ; Kang, S. ; Kim, EB; Kim, HW Fondamentaux de la voltamétrie cyclique. *J. Sens. Sci. Technologie.* 2021, 30, 384-387. [\[Référence croisée\]](#)
28. Inzelt, G. Chronoampérométrie, Chronocoulométrie et Chronopotentiométrie. Dans *Encyclopédie d'électrochimie appliquée* ; Springer Nature : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2014. [\[CrossRef\]](#)
29. Bakker, E. ; Pretsch, E. Potentiométrie moderne. *Angew. Chimique.—Int. Éd.* 2007, 46, 5660-5668. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
30. Chmayssem, A. ; Verplanck, N. ; Tanase, CE; Costa, G. ; Monsalve-Grijalba, K. ; Amigues, S. ; Alias, M. ; Gougis, M. ; Mourier, V. ; Vignoud, S. ; et coll. Développement d'une plateforme de (bio)détection multiparamétrique pour la surveillance continue des métabolites du stress. *Talante* 2021, 229, 122275. [\[CrossRef\]](#)
31. Chmayssem, A. ; Hauchard, D. Détection directe d'ultra-traces d'alkylphénols dans l'eau à l'aide d'un capteur à microélectrode à cavité en pâte de carbone. *Traitement de l'eau de dessalement.* 2017, 83, 321-326. [\[Référence croisée\]](#)
32. Liu, Y. ; Xue, Q. ; Chang, C. ; Wang, R. ; Liu, Z. ; He, L. Progrès récents concernant les capteurs électrochimiques pour la détection de polluants typiques dans les environnements aquatiques. *Anal. Sci.* 2022, 38, 55-70. [\[Référence croisée\]](#)
33. Karthik, V. ; Selvakumar, P. ; Senthil Kumar, P. ; Satheeskumar, V. ; Godwin Vijaysunder, M. ; Hariharan, S. ; Antony, K. Progrès récents dans le développement de capteurs électrochimiques pour la détection de polluants émergents dans l'environnement aquatique. *Chemosphère* 2022, 304, 135331. [\[CrossRef\]](#)
34. Boumya, W. ; Taoufik, N. ; Achak, M. ; Bessbousse, H. ; Elhalil, A. ; Barka, N. Capteurs électrochimiques et biocapteurs pour la détermination du diclofénac dans les échantillons pharmaceutiques, biologiques et aqueux. *Talanta Open* 2020, 3, 100026. [\[CrossRef\]](#)
35. Sohrabi, H. ; Dezhakam, E. ; Khataee, A. ; Nozohouri, E. ; Majidi, M. ; Mohseni, N. ; Trofimov, E. ; Yoon, Y. Tendances récentes des capteurs (bio)électrochimiques et optiques à base d'hydroxydes doubles en couches pour le criblage de composés pharmaceutiques émergents. *Environ. Rés.* 2022, 211, 113068. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
36. Malzahn, K. ; Moulin à vent, JR ; Valdés-Ramírez, G. ; Schöning, MJ; Wang, J. Capteurs électrochimiques portables pour l'analyse in situ en milieux marins. *Analyte* 2011, 136, 2912-2917. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
37. Commission européenne. Une stratégie de l'UE pour exploiter le potentiel des énergies renouvelables offshore pour un avenir climatiquement neutre ; Commission européenne : Bruxelles, Belgique, 2020.
38. Dong, J. ; Zeng, J. ; Yang, Y. ; Wang, H. Un examen de la loi et de la politique sur la décarbonisation du transport maritime. *Devant. Mars Sci.* 2022, 9, 1076352. [\[Réf. croisée\]](#)
39. Madurai Elavarasan, R. ; Pugazhendhi, R. ; Irfan, M. ; Mihet-Popa, L. ; Khan, IA ; Campana, PE Des approches durables de pointe pour une décarbonisation plus profonde en Europe – Un don pour une vision neutre sur le plan climatique. *Renouveler. Soutenir. Energy Rev.* 2022, 159, 112204. [\[CrossRef\]](#)
40. Beccarello, M. ; Di Foggia, G. Revue et perspectives des principaux moteurs de la décarbonisation jusqu'en 2030. *Energies* 2023, 16, 1345. [\[CrossRef\]](#)
41. Nesterenko, N. ; Medeiros-Costa, IC; Clatworthy, EB; Cruchade, H. ; Konnov, SV; Dath, JP ; Gilson, JP; Mintova, S. Méthane en Produits chimiques : une voie vers la décarbonisation. *Natl. Sci. Rév.* 2023, 10, nwad116. [\[Référence croisée\]](#)
42. Papadis, E. ; Tsatsaronis, G. Défis de la décarbonisation du secteur énergétique. *Énergie* 2020, 205, 118025. [\[CrossRef\]](#)
43. Taurat, P. ; Lalin, B. ; Schmidt, TS; Steffen, B. Orientations de l'innovation pour la décarbonisation de la production de ciment et d'acier— Une analyse basée sur la modélisation de sujets. *J. Nettoy. Prod.* 2023, 407, 137055. [\[Réf. croisée\]](#)
44. Zier, M. ; Stenzel, P. ; Kotzur, L. ; Stolten, D. Un examen des options de décarbonisation pour l'industrie du verre. *Convertisseurs d'énergie. Gérer. X* 2021, 10, 100083. [\[CrossRef\]](#)
45. Ghisolfi, V. ; Tavasszy, LA; Correia, GHdA; Chaves, GdLD; Ribeiro, GM Décarbonisation du transport de marchandises : une démarche systématique Revue de la littérature sur les modèles de dynamique des systèmes. *Durabilité* 2022, 14, 3625. [\[CrossRef\]](#)
46. Raza, MON ; Zhongpan, Q. ; Pengju, W. Consommation d'énergie liée à l'agriculture, politique alimentaire et réduction des émissions de CO₂ : Nouvelles perspectives du Pakistan. *Devant. Environ. Sci.* 2023, 10, 1099813. [\[CrossRef\]](#)

47. Palou-Rivera, I.; Grieco, W. Rôle des processus électrochimiques dans la dynamique de décarbonisation industrielle. Rencontre ECS. Résumé. 2022, MA2022-01, 2338. [\[CrossRef\]](#)
48. Griffiths, S.; Sovacool, BK; Kim, J.; Bazilien, M.; Uratani, JM Décarbonisation industrielle via l'hydrogène : un examen critique et systématique des développements, des systèmes socio-techniques et des options politiques. Rés. énergétique. Soc. Sci. 2021, 80, 102208. [\[Réf. croisée\]](#)
49. Schiffer, ZJ; Manthiram, K. Électrification et décarbonisation de l'industrie chimique. Joule 2017, 1, 10-14. [\[Référence croisée\]](#)
50. Mallapragada, DS; Dvorkin, Y.; Modestin, MA; Esposito, DV; Smith, Washington; Hodge, BM; Harold, député; Donnelly, V.M.; Nuz, A.; Bloomquist, C.; et coll. Décarbonisation de l'industrie chimique grâce à l'électrification : obstacles et opportunités. Joule 2023, 7, 23-41. [\[Référence croisée\]](#)
51. Brannstrom, C. Le(s) avenir(s) énergétique(s) émergent(s) des énergies renouvelables et de l'électrochimie : faire progresser ou saper la démocratie énergétique ? Dans Démocraties énergétiques pour un avenir durable ; Academic Press : Cambridge, MA, États-Unis, 2022. [\[CrossRef\]](#)
52. Xia, R.; Overa, S.; Jiao, F. Processus électrochimiques émergents pour décarboniser l'industrie chimique. JACS Au 2022, 2, 1054-1070. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
53. Brimley, P.; Almajed, H.; Alsunni, Y.; Alherz, AW; Nu, ZJL; Smith, Washington; Musgrave, CB Réduction électrochimique du CO₂ sur des catalyseurs à atome unique en graphène dopés au métal/azote, modélisés à l'aide de la théorie fonctionnelle grand canonique de la densité. ACS Catal. 2022, 12, 10161-10171. [\[Référence croisée\]](#)
54. Lvov, SN; Beck, JR; LaBarbera, MS Réduction électrochimique du CO₂ en carburants. Dans les carburants et les vecteurs énergétiques neutres en carbone ; CRC Press : Boca Raton, FL, États-Unis, 2020. [\[CrossRef\]](#)
55. Pomerantseva, E.; Bonaccorso, F.; Feng, X.; Cui, Y.; Gogotsi, Y. Stockage d'énergie : l'avenir rendu possible par les nanomatériaux. Science 2019, 366, eaan8285. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
56. Kang, H.; Jung, S.; Lee, M.; Hong, T. Comment mieux partager l'énergie pour une ville neutre en carbone ? Un examen des stratégies d'application du système de stockage d'énergie par batterie en ville. Renouveler. Soutenir. Energy Rev. 2022, 157, 112113. [\[CrossRef\]](#)
57. Sufyan, M.; Rahim, NA; Aman, MM; Tan, CK; Raihan, SRS Dimensionnement et applications des technologies de stockage d'énergie par batterie dans Système de réseau intelligent : une revue. J. Renouveler. Soutenir. Énergie 2019, 11, 014105. [\[CrossRef\]](#)
58. Dehghani-Sanij, AR; Tharumalingam, E.; Dusseault, Manitoba; Fraser, R. Étude des systèmes de stockage d'énergie et des défis environnementaux des batteries. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév. 2019, 104, 192-208. [\[Référence croisée\]](#)
59. Li, Y.; Yang, J.; Song, J. Modèle de structure de conception et technologie d'énergie renouvelable pour les batteries rechargeables vers un modèle plus écologique et Véhicule électrique plus durable. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév. 2017, 74, 19-25. [\[Référence croisée\]](#)
60. Rydh, CJ Évaluation environnementale des batteries au vanadium redox et au plomb pour le stockage d'énergie stationnaire. J. Sources d'énergie 1999, 80, 21-29. [\[Référence croisée\]](#)
61. Wang, Z.; Yang, J.; Qu, R.; Xiao, G. Évaluation de l'impact environnemental de la batterie démantelée : étude de cas d'une centrale électrique Usine de batteries au plomb en Chine. Processus 2023, 11, 2119. [\[CrossRef\]](#)
62. Divya, KC; Østergaard, J. Technologie de stockage d'énergie par batterie pour les systèmes électriques - Un aperçu. Electr. Système d'alimentation. Rés. 2009, 79, 511-520. [\[Référence croisée\]](#)
63. Abraham, KM Perspectives et limites du stockage d'énergie dans les batteries. J. Phys. Chimique. Lett. 2015, 6, 830-844. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
64. Huang, Y.; Dong, Y.; Li, S.; Lee, J.; Wang, C.; Zhu, Z.; Xue, W.; Li, Y.; Li, J. Cathodes spinelles au lithium-manganèse pour batteries lithium-ion. Av. Matière énergétique. 2020, 11, 2000997. [\[Réf. croisée\]](#)
65. Widyantara, RD; Zulaikah, S.; Juangsa, FB; Budiman, BA; Aziz, M. Examen des stratégies de conception d'emballage de batterie pour une qualité supérieure Gestion thermique dans les véhicules électriques. Piles 2022, 8, 287. [\[CrossRef\]](#)
66. Schöberl, J.; Ank, M.; Schreiber, M.; Wassiliadis, N.; Lienkamp, M. Propagation de l'emballement thermique dans les batteries automobiles lithium-ion avec cathodes NMC-811 et LFP : exigences de sécurité et impact sur l'intégration du système. Transport électronique 2024, 19, 100305.
67. Trahey, L.; Brushett, FR; Balsara, PN; Céder, G.; Cheng, L.; Chiang, YM; Hahn, Territoires du Nord-Ouest; Ingram, BJ; Minter, SD; Moore, JS; et coll. Le stockage d'énergie émergent : une perspective du Centre commun de recherche sur le stockage d'énergie. Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis 2020, 117, 12550-12557. [\[Référence croisée\]](#)
68. Barbosa, JC; Fidalgo-Marijuan, A.; Dias, JC; Gonçalves, R.; Salado, M.; Costa, CM; Lanceros-Méndez, S. Conception moléculaire de Polymères fonctionnels pour batteries à radicaux organiques. Matière de stockage d'énergie. 2023, 60, 102841. [\[Réf. croisée\]](#)
69. Hager, MD; Esser, B.; Feng, X.; Schuhmann, W.; Théato, P.; Schubert, batteries américaines à base de polymères : énergie flexible et fine Systèmes de stockage. Av. Maître. 2020, 32, e2000587. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
70. Choi, S. Biopiles et biobatteries : idées fausses, opportunités et défis. Piles 2023, 9, 119. [\[CrossRef\]](#)
71. Patra, S.; Verma, J.; Mishra, Yukon; Kurinec, S.; Wang, Q.; Syväjärvi, M.; Tiwari, A. Le positionnement des biobatteries à base de biopiles pour un avenir énergétique net zéro. J. Stockage d'énergie 2023, 72, 107919. [\[CrossRef\]](#)
72. Nguyen, TH; Fraiwan, A.; Choi, S. Piles à base de papier : une revue. Biosens. Bioélectron. 2014, 54, 640-649. [\[Référence croisée\]](#)
73. Yazdi, AA; Preite, R.; Milton, RD; Hickey, DP; Minter, SD; Xu, J. Biobatterie rechargeable au glucose sans membrane : vers Cathodes à semi-conducteurs pour dispositifs enzymatiques implantables. J. Sources d'énergie 2017, 343, 103-108. [\[Référence croisée\]](#)
74. Garland, Territoires du Nord-Ouest; Kaveti, R.; Bandodkar, AJ Biopiles, batteries et supercondensateurs activés par des biofluides : une étude complète Revir. Av. Maître. 2023, 35, e2303197. [\[Référence croisée\]](#)
75. Li, P.; Kim, H.; Myung, ST; Sun, YK détourne l'exploration de l'anode en silicium vers une voie pratique : une revue axée sur le composite silicium-graphite pour les batteries au lithium-ion. Matière de stockage d'énergie. 2020, 35, 550-576. [\[Référence croisée\]](#)
76. Fichtner, M. Recherches et progrès récents dans le domaine des batteries pour véhicules électriques. Battre. Supercaps 2022, 5, e20210022. [\[Référence croisée\]](#)

77. Li, Y. ; Yang, J. ; Song, J. Modèle de système nano-énergétique et effet à l'échelle nanométrique de la batterie au graphène dans les énergies renouvelables électriques Véhicule. Renouveler. Soutenir. Énergie Rév. 2016, 69, 652-663. [\[Référence croisée\]](#)
78. Raccichini, R. ; Varzi, A. ; Passerini, S. ; Scrosati, B. Le rôle du graphène pour le stockage électrochimique de l'énergie. Nat. Maître. 2015, 14, 271-279. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
79. Hu, B. ; Wang, X. Avancées dans les batteries micro lithium-ion pour les applications sur puce et portables. J. Micromech. Microeng. 2021, 31, 114002. [\[Réf. croisée\]](#)
80. Muench, S. ; Burges, R. ; Lex-Balducci, A. ; Brendel, JC ; Jäger, M. ; Friebé, C. ; Sauvage, A. ; Schubert, Adaptation américaine d'électrodes et d'électrolytes polymères en gel imprimables pour des batteries entièrement organiques optimisées. J. Polym. Sci. 2021, 59, 494-501. [\[Référence croisée\]](#)
81. Hiver, M. ; Brodd, RJ Que sont les batteries, les piles à combustible et les supercondensateurs ? Chimique. Rév. 2004, 104, 4245-4270. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
82. Isa, NNC; Mohd, Y. ; Zaki, MHM; Mohamad, SAS Caractérisation du revêtement de cuivre électrodéposé sur l'acier inoxydable Substrat. Int. J. Electrochem. Sci. 2017, 12, 6010-6021. [\[Référence croisée\]](#)
83. Trentin, A. ; Pakseresht, A. ; Duran, A. ; Castro, Y. ; Galusek, D. Caractérisation électrochimique des revêtements polymères pour la protection contre la corrosion : un examen des avancées et des perspectives. Polymères 2022, 14, 2306. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
84. Molina, J. ; Estèves, MF; Fernández, J. ; Bonastre, J. ; Cas, F. Tissus conducteurs enduits de polyaniline. Produits chimiques et électrochimiques Caractérisation cal. EUR. Polyme. J. 2011, 47, 2003-2015. [\[Référence croisée\]](#)
85. Stangl, A. ; Muñoz-Rojas, D. ; Burriel, M. Techniques de caractérisation in situ et operando pour les cellules électrochimiques à oxyde solide : progrès récents. J. Phys. Énergie 2021, 3, 012001. [\[CrossRef\]](#)
86. Raffee, M. ; Abrams, DJ ; Cardinale, L. ; Goss, Z. ; Romero-Arenas, A. ; Stahl, SS Voltammétrie et chronoampérométrie cycliques : outils mécanistiques pour l'électrosynthèse organique. Chimique. Soc. Rév. 2024, 53, 566-585. [\[Référence croisée\]](#)
87. Elgrishi, N. ; Rountree, KJ; McCarthy, BD; Rountree, ES ; Eisenhart, TT; Dempsey, JL Un guide pratique du débutant sur la voltamétrie cyclique. J. Chem. Educ. 2018, 95, 197-206. [\[Référence croisée\]](#)
88. Guziejewski, D. ; Stojanov, L. ; Zwierzak, Z. ; Compton, RG; Mirceski, V. Cinétique des électrodes à partir d'une seule expérience : analyse multi-amplitude en chronoampérométrie à ondes carrées. Phys. Chimique. Chimique. Phys. 2022, 24, 24419-24428. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
89. Lee, GY; Parc, JH ; Chang, YW; Cho, S. ; Kang, MJ; Pyun, JC Cyclage Redox basé sur la chronoampérométrie pour application à Immunoessais. ACS Sens. 2018, 3, 106-112. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
90. Volodine, IA ; Stolze, C. ; Casas Mesa, C. ; Haagen, U. ; Terechin, C. ; Hager, MD; Schubert, États-Unis Au-delà des conditions d'état d'équilibre : mesures chronoampérométriques de l'état de charge et de l'état de santé des électrolytes de batterie à débit. Sens. Actionneurs B Chem. 2024, 403, 135101. [\[Réf. croisée\]](#)
91. Parrilla, M. ; Cuartero, M. ; Crespo, GA Capteurs d'ions potentiométriques portables. TrAC—Tendances anal. Chimique. 2019, 110, 303-320. [\[Référence croisée\]](#)
92. Düzgün, A. ; Zelada-Guillén, Géorgie ; Crespo, Géorgie ; MacHo, S. ; Riu, J. ; Rius, Matériaux nanostructurés FX en potentiométrie. Anal. Bioanal. Chimique. 2011, 399, 171-181. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
93. Ding, J. ; Qin, W. Progrès récents dans les biocapteurs potentiométriques. TrAC—Tendances anal. Chimique. 2020, 124, 115803. [\[Réf. croisée\]](#)
94. Lin, Z. ; Wu, D. ; Du, C. ; Ren, Z. Une méthode potentiométrique améliorée pour la mesure du coefficient d'entropie du lithium-ion Batterie basée sur un ajustement positif. Rapport énergétique 2022, 8, 54-63. [\[Référence croisée\]](#)
95. Chmayssem, A. ; Tanase, CE; Verplanck, N. ; Gougis, M. ; Mourier, V. ; Zebda, A. ; Ghaemmaghami, AM; Mailley, P. Nouveau système microfluidique pour l'évaluation par spectroscopie d'impédance électrochimique des performances de la culture cellulaire : conception et développement d' un nouveau matériau d'électrode. Biocapteurs 2022, 12, 452. [\[CrossRef\]](#)
96. Zhang, M. ; Liu, Y. ; Couvercle, ; Cui, X. ; Wang, L. ; P'tit, Wang, K. Spectroscopie d'impédance électrochimique : un nouveau chapitre dans l' estimation rapide et précise de l'état de santé des batteries lithium-ion. Énergies 2023, 16, 1599. [\[CrossRef\]](#)
97. Choi, W. ; Shin, SC ; Kim, JM; Choi, JY ; Yoon, WS Modélisation et applications de la spectroscopie d'impédance électrochimique (Eis) pour les batteries lithium-ion. J. Electrochem. Sci. Technologie. 2020, 11, 1-13. [\[Référence croisée\]](#)
98. Brett, CMA Spectroscopie d'impédance électrochimique dans la caractérisation et l'application d'électrodes modifiées pour Capteurs électrochimiques et biocapteurs. Molécules 2022, 27, 1497. [\[CrossRef\]](#)
99. Magar, HS; Hassan, RYA; Mulchandani, A. Spectroscopie d'impédance électrochimique (Eis) : principes, construction et Applications de biodétection. Capteurs 2021, 21, 6578. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
100. Cachet-Vivier, C. ; Keddad, M. ; Vivier, V. ; Yu, LT Développement de dispositifs à microélectrodes à cavité et leurs utilisations dans divers Domaines de recherche. J. Electroanal. Chimique. 2013, 688, 12-19. [\[Référence croisée\]](#)
101. Tremblay, ML; Martin, MH; Lebouin, C. ; Lasia, A. ; Guay, D. Détermination de la surface réelle des matériaux en poudre dans les microélectrodes à cavité par spectroscopie d'impédance électrochimique. Electrochimie. Acta 2010, 55, 6283-6291. [\[Référence croisée\]](#)
102. Cachet-Viviera, C. ; Vivier, V. ; Cha, CS ; Nédélec, JY; Yu, LT Electrochimie des matériaux en poudre étudiée au moyen du Microélectrode à cavité (CME). Electrochimie. Acta 2001, 47, 181-189. [\[Référence croisée\]](#)
103. Vivier, V. ; Cachet-Vivier, C. ; Cha, CS ; Nédélec, JY; Yu, microélectrode à cavité LT pour l'étude des matériaux de batterie : application à Poudre de polyaniline. Electrochimie. Commun. 2000, 2, 180-185. [\[Référence croisée\]](#)
104. Hasegawa, N. ; Shoji, K. Contrôle du volume des microcavités sur une pointe d'électrodes Ag/AgCl pour des mesures de courant de canal stables des nanopores biologiques. Analyste 2022, 147, 1191-1198. [\[Référence croisée\]](#)
105. Huang, X. ; Shi, X. ; Zeng, H. Dans quelle mesure la récupération du cuivre/nickel par rapport à l'application pratique dans la galvanoplastie Eaux usées? Ressource. Conserver. Recycler. Av. 2023, 19, 200170. [\[CrossRef\]](#)

106. Mohajeri, R. ; Alipour, Z. ; Hajhosseini, S. ; Mirzaei, SI; Fardmanesh, M. Caractérisation des électrodes revêtues de platine encapsulées dans un canal microfluidique pour les applications d'impédancemétrie. Dans Actes de la 28e Conférence nationale et 6e Conférence internationale iranienne sur le génie biomédical 2021 (ICBME 2021), Téhéran, Iran, 25-26 novembre 2021. [\[CrossRef\]](#)
107. Solonine, MD; Asnis, Caroline du Nord ; Grigorian, Nouvelle-Écosse; Vagramyan, TA Nettoyage du fil de tungstène fin avant la galvanoplastie à l'or. Tsvetnye Rencontré. 2023, 2023, 58-63. [\[Référence croisée\]](#)
108. Menk, LA; Baca, ED; Hollowell, AE Électrodéposition de cuivre dans des vias aveugles à mésoéchelle via du silicium. Rencontre ECS. Résumé. 2018, MA2018-02, 823. [\[Réf. croisée\]](#)
109. Mochizuki, C. ; Senga, T. ; Shibata, M. Électrodéposition de films de verre métallique Pd-Ni-P. Électrochimie 2011, 79, 249-251. [\[Référence croisée\]](#)
110. Krywko-Cendrowska, A. ; Strawski, M. ; Szklarczyk, M. Électrodéposition à basse température de films SiOx photoactifs dans une solution aqueuse. Électrochimie. Acta 2013, 108, 112-117. [\[Référence croisée\]](#)
111. Liu, AS; Oliveira, MAS Électrodéposition de films de polypyrrole sur aluminium à partir d'une solution aqueuse de tartrate. J. Braz. Chimique. Soc. 2007, 18, 143-152. [\[Référence croisée\]](#)
112. Sayah, A. ; Habelhames, F. ; Bahloul, A. ; Boudjadi, A. L'effet du potentiel appliqué de l'électrodéposition sur l'électrochimie Performance des films de polyaniline. J. Mater. Sci. Maître. Électron. 2021, 32, 10692-10701. [\[Référence croisée\]](#)
113. Lata, S. ; Batra, B. ; Kumar, P. ; Pundir, CS Construction d'un biocapteur ampérométrique d'acide D-aminé basé sur de l'acide d-aminé oxydase/un nanotube de carbone à parois multiples carboxylé/des nanoparticules de cuivre/une électrode d'or modifiée par polyaniline. Anal. Biochimie. 2013, 437, 1-9. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
114. Ji, J. ; Zhu, X. ; Maini, Li, M. ; Zhang, Q. ; Shu, Y. ; Cheng, Z. ; Zhang, W. ; Hua, E. ; Sang, S. Électrodéposition AC de films PEDOT dans des liquides ioniques protiques pour transistors électrochimiques organiques stables à long terme. Molécules 2019, 24, 4105. [\[CrossRef\]](#)
115. Martínez-Viademonte, député; Abrahami, ST; Hacker, T. ; Burchardt, M. ; Terryn, H. Une revue sur l'anodisation de l'aluminium aérospatial Alliages pour la protection contre la corrosion. Revêtements 2020, 10, 1106. [\[CrossRef\]](#)
116. Iwasaki, M. Anodisation du titane. J. Surf. Finition. Soc. Jpn. 2022, 73, 28-32. [\[Référence croisée\]](#) 117. de Sousa Araujo, JV ; da Silva, RMP; Klumpp, RE; Costa, I. Le processus d'anodisation de l'aluminium et de ses alliages : un historique et approche électrochimique. Quim. Nova 2021, 44, 999-1011. [\[Référence croisée\]](#)
118. Schneider, M. ; Fürbeth, W. Anodisation : les pores font la différence. Maître. Corros. 2022, 73, 1752-1765. [\[Référence croisée\]](#)
119. Tsangaraki-Kaplanoglou, I. ; Théohari, S. ; Dimogerontakis, T. ; Wang, YM ; Kuo, HH ; Kia, S. Effet des types d'alliage sur le Processus d'anodisation de l'aluminium. Le surf. Manteau. Technologie. 2006, 200, 2634-2641. [\[Référence croisée\]](#)
120. Schneider, M. ; Kremmer, K. ; Weidmann, Saskatchewan ; Fürbeth, W. Interaction entre la variation des paramètres et la structure de l'oxyde d'un Processus PAA modifié. Le surf. Interface Anale. 2013, 45, 1503-1509. [\[Référence croisée\]](#)
121. Kuntiyi, O. ; Zozulya, G. ; Shepida, M. Formation de silicium poreux par gravure électrochimique. Av. Maître. Sci. Ing. 2022, 2022, 1482877. [\[Réf. croisée\]](#)
122. Zhang, L. ; Lu, D. ; Deng, H. Étude sur les mécanismes d'élimination de matière dans le polissage électrochimique amélioré du GaN. J. Fab. Processus 2022, 73, 903-913. [\[Référence croisée\]](#)
123. Fiuczek, N. ; Sawicka, M. ; Feduniewicz-Zmuda, A. ; Siekacz, M. ; Zak, M. ; Nowakowski-Szkudlarek, K. ; Muzioł, G. ; Wolny, P. ; Kelly, JJ ; Skierbiszewski, C. Gravure électrochimique de GaN de type P utilisant une jonction tunnel pour une injection efficace de trous. Acta Mater. 2022, 234, 118018. [\[Réf. croisée\]](#)
124. Soleil, W. ; Shah, SA ; Chen, Y. ; Tan, Z. ; Gao, H. ; Habib, T. ; Radovic, M. ; Green, MJ Gravure électrochimique de Ti2AlC en Ti2CT:X (MXène) dans une solution d'acide chlorhydrique à faible concentration. J. Mater. Chimique. Un Maître. 2017, 5, 21663-21668. [\[Référence croisée\]](#)
125. Jiang, Y. ; Wang, L. ; Meunier, M. ; Mirsaidov, U. Voies de formation de nanoparticules d'alliage poreux par le biais de produits chimiques sélectifs et gravure électrochimique. Petit 2021, 17, 2006953. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
126. Peng, N. ; Hé. ; Yang, H. Effets de la teneur en H2SO4 sur l'activation électrochimique des tunnels gravés sur la feuille d'aluminium. Corrosion 2018, 74, 75-82. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
127. Peng, N. ; Wen, Y. ; Lui, Y. Répartition améliorée des tunnels gravés sur une feuille d'aluminium avec traitement au silane. Programme. Org. Manteau. 2019, 127, 151-156. [\[Référence croisée\]](#)
128. Kaya, D. ; Keçeci, K. Review — Membranes polymères nanoporeuses gravées sur piste en tant que capteurs : une revue. J. Electrochem. Soc. 2020, 167, 037543. [\[Réf. croisée\]](#)
129. Chen, Y. ; Ouais. ; Zhong, Y. ; Dong, S. ; Hou, M. ; Liu, H. ; Chen, X. ; Gao, J. ; Wong, C.-P. Revue : Progrès dans la gravure électrochimique des semi-conducteurs de troisième génération. ECS J. Solid State Sci. Technologie. 2023, 12, 045004. [\[Réf. croisée\]](#)
130. Lin, JC ; Liu, YC ; Lu, SH; Yen, HN ; Settu, K. Amélioration de la capacité spécifique d'un condensateur poreux à base de silicium en incorporant du graphène combiné à une gravure électrochimique tridimensionnelle. Électrochimie. Commun. 2023, 154, 107555. [\[Référence croisée\]](#)
131. Lazanas, AC; Prodromidis, MI Spectroscopie d'impédance électrochimique - Un didacticiel. Mesures ACS. Sci. Au 2023, 3, 162-193. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
132. Chmayssem, A. ; Monsalve-Grijalba, K. ; Alias, M. ; Mourier, V. ; Vignoud, S. ; Scomazzon, L. ; Müller, C. ; Barthes, J. ; Vrana, NE; Mailley, P. Méthode de référence pour l'analyse hors ligne des oxydes d'azote dans les milieux de culture cellulaire par un détecteur de chimiluminescence à base d'ozone. Anal. Bioanal. Chimique. 2021, 413, 1383-1393. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
133. Chmayssem, A. ; Petit, L. ; Verplanck, N. ; Mourier, V. ; Vignoud, S. ; Vrana, NE; Mailley, P. Caractérisation de l'impact des milieux de culture cellulaire classiques sur la réponse des capteurs électrochimiques. Electroanalyse 2022, 34, 1201-1211. [\[Référence croisée\]](#)

134. Escarpa, A. Électroanalyse alimentaire : sens et simplicité. *Chimique. Rec.* 2012, 12, 72-91. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
135. Bussoso, A. ; Tubbs, E. ; Revol-Cavalier, F. ; Chmayssem, A. ; Alessio, M. ; Cosnier, M.-L. ; Verplanck, N. Surveillance en temps réel des niveaux d'oxygène dans les dispositifs d'organes sur puce thermoplastiques. *Électron SSRN. J.* 2022, 11, 4090175. [\[CrossRef\]](#)
136. Bühlmann, P. ; Pretsch, E. ; Bakker, E. Électrodes sélectives d'ions basées sur des porteurs et optodes en vrac. 2. Ionophores pour potentiométriques et capteurs optiques. *Chimique. Rév.* 1998, 98, 1593-1688. [\[Référence croisée\]](#)
137. Lonsdale, W. Développement, fabrication et application d'un capteur de PH à semi-conducteurs utilisant de l'oxyde de ruthénium ; Université Edith Cowan : Joondalup, WA, Australie, 2018.
138. Liu, Y. ; Pharr, M. ; Salvatore, GA Lab-on-Skin : un examen de l'électronique flexible et extensible pour la surveillance de la santé des appareils portables. *ACS Nano* 2017, 11, 9614-9635. [\[Référence croisée\]](#)
139. Gao, W. ; Emaminejad, S. ; Nyein, HYY ; Challa, S. ; Chen, K. ; Peck, A. ; Fahad, HM ; Ota, H. ; Shiraki, H. ; Kiriya, D. ; et coll. Réseaux de capteurs portables entièrement intégrés pour l'analyse multiplexée de la transpiration in situ. *Nature* 2016, 529, 509-514. [\[Référence croisée\]](#)
140. Soranzo, T. ; Ben Tahar, A. ; Chmayssem, A. ; Zelsmann, M. ; Vadgama, P. ; Lenormand, JL ; Cinquin, P. ; Martin, Danemark ; Zebda, A. Biodétection électrochimique du glucose basée sur la réduction enzymatique du glucose. *Capteurs* 2022, 22, 7105. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
141. Chmayssem, A. ; Shalalay, moi. ; Marinesco, S. ; Zebda, A. Enquête sur la stabilité de GOx dans une matrice de chitosane : applications pour Électrodes enzymatiques. *Capteurs* 2023, 23, 465. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
142. Chmayssem, A. ; Nadolska, M. ; Tubbs, E. ; Sadowska, K. ; Vadgama, P. ; Shitanda, moi ; Tsujimura, S. ; Lattach, Y. ; Paon, M. ; Tingry, S. ; et coll. Aperçu de la surveillance continue de la glycémie : des bases médicales aux appareils commercialisés. *Microchim. Acta* 2023, 190, 177. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
143. Yoo, EH ; Lee, SY Biocapteurs de glucose : un aperçu de leur utilisation en pratique clinique. *Capteurs* 2010, 10, 4558-4576. [\[Référence croisée\]](#)
144. Singh, N. ; Goldsmith, BR Rôle de l'électrocatalyse dans l'assainissement des polluants de l'eau. *ACS Catal.* 2020, 10, 3365-3371. [\[Référence croisée\]](#)
145. Naidu, R. ; Biswas, B. ; Willett, IR ; Cribb, J. ; Kumar Singh, B. ; Paul Nathanail, C. ; Coulon, F. ; Semple, KT ; Jones, KC ; Barclay, A. ; et coll. Pollution chimique : un péril croissant et un risque catastrophique potentiel pour l'humanité. *Environ. Int.* 2021, 156, 106616. [\[Référence croisée\]](#)
146. Isaraïn-Chávez, E. ; De La Rosa, C. ; Godínez, LA ; Brillas, E. ; Peralta-Hernández, JM Étude comparative des processus de traitement électrochimique de l'eau pour les effluents d'eaux usées d'une tannerie. *J. Electroanal. Chimique.* 2014, 713, 62-69. [\[Référence croisée\]](#)
147. Feng, A. ; Feng, J. ; Xing, W. ; Jiang, K. ; Tang, W. Applications polyvalentes des systèmes à circulation électrochimique dans les processus de traitement de l'eau. *Chimique. Ing. J.* 2023, 473, 145400. [\[CrossRef\]](#)
148. Alvarado, L. ; Chen, A. Électrodéionisation : principes, stratégies et applications. *Électrochimie. Acta* 2014, 132, 583-597. [\[Référence croisée\]](#)
149. Salari, K. ; Zarafshan, P. ; Khashehchi, M. ; Chegini, G. ; Etezadi, H. ; Karami, H. ; Szulzyk-Cieplak, J. ; İğn, G. Connaissances et technologies utilisées dans la désionisation capacitive de l'eau. *Membranes* 2022, 12, 459. [\[CrossRef\]](#)
150. Wang, K. ; Li, H. ; Yang, Y. ; Wang, P. ; Zheng, Y. ; Song, L. Rendre les composites cathodiques plus efficaces pour Electro-Fenton et Systèmes Bio-Electro-Fenton : une revue. *Sept. Purif. Technologie.* 2022, 304, 122302. [\[Réf. croisée\]](#)
151. Lui, L. ; Du, P. ; Chen, Y. ; Lu, H. ; Cheng, X. ; Chang, B. ; Wang, Z. Progrès dans les piles à combustible microbiennes pour le traitement des eaux usées. *Renouveler. Soutenir. Énergie Rév.* 2017, 71, 388-403. [\[Référence croisée\]](#)
152. Sillanpää, M. ; Shestakova, M. Méthodes électrochimiques émergentes et combinées. Dans *Méthodes de traitement électrochimique de l'eau : principes fondamentaux, méthodes et applications à grande échelle* ; Elsevier Inc. : Amsterdam, Pays-Bas, 2017 ; Chapitre 3, pp. 131-225. [\[Référence croisée\]](#)
153. Azanaw, A. ; Birlie, B. ; Teshome, B. ; Jemerie, M. Méthodes de traitement des effluents textiles et résolution écologique des textiles Eaux usées. *Goujon de cas. Chimique. Environ. Ing.* 2022, 6, 100230. [\[CrossRef\]](#)
154. Vineta, S. ; Silvana, Z. ; Sanja, R. ; Golomeova, S. Méthodes de traitement des eaux usées dans l'industrie textile. Dans les actes du Conférence scientifique internationale « UNITECH 2014 », Gabrovo, Bulgarie, 21-22 novembre 2014.
155. Behera, M. ; Nayak, J. ; Banerjee, S. ; Chakraborty, S. ; Tripathy, SK Une revue du traitement des effluents de l'industrie textile en vue du développement d'une stratégie d'atténuation efficace : une approche de conception de système intégrée. *J. Environ. Chimique. Ing.* 2021, 9, 105277. [\[Réf. croisée\]](#)
156. Samsami, S. ; Mohamadi, M. ; Sarrafzadeh, MH ; René, ER ; Firoozbahr, M. Progrès récents dans le traitement des eaux usées contenant des colorants provenant des industries textiles : aperçu et perspectives. *Processus Saf. Environ. Prot.* 2020, 143, 138-163. [\[Référence croisée\]](#)
157. Labidi, A. ; Salaberria, AM ; Fernandes, SCM ; Labidi, J. ; Abderrabba, M. Dérivé fonctionnel de chitosane et chitine comme matériaux de décoloration pour le bleu de méthylène et l'orange de méthyle à partir d'une solution aqueuse. *Matériaux* 2019, 12, 361. [\[CrossRef\]](#)
158. Meng, XL ; Nie, Y. ; Soleil, J. ; Cheng, GT ; Wang, JQ ; Lui, HY ; Zhang, SJ ont fonctionnalisés les polymères dicyandiamide-formaldéhyde en tant que catalyseurs hétérogènes efficaces pour la conversion du CO2 en carbonates organiques. *Vert. Chimique.* 2014, 16, 2771-2778. [\[Référence croisée\]](#)
159. Alinsafi, A. ; Évenou, F. ; Abdulkarim, EM ; Pons, Minnesota ; Zahraa, O. ; Benhammou, A. ; Yaacoubi, A. ; Nejmeddine, A. Traitement de Eaux usées de l'industrie textile par photocatalyse assistée. *Colorants Pigments* 2007, 74, 439-445. [\[Référence croisée\]](#)
160. İlhan, F. ; Ulucan-Altuntas, K. ; Dogan, C. ; Kurt, U. Traitabilité des eaux usées textiles brutes à l'aide du procédé Fenton et sa comparaison avec la coagulation chimique. *Traitement de l'eau de dessalement.* 2019, 162, 142-148. [\[Référence croisée\]](#)
161. Kaur, P. ; Kushwaha, JP ; Sangal, VK Traitement oxydatif électrocatalytique des eaux usées textiles réelles dans un réacteur continu : étude des voies de dégradation et de l'élimination. *J. Hazard. Maître.* 2018, 346, 242-252. [\[Référence croisée\]](#)

162. Mukimin, A. ; Wijaya, K. ; Kuncaka, A. Oxydation du Remazol Brilliant Blue r (RB.19) avec un actif électrogénéré in situ
Chlore utilisant une électrode Ti/PbO₂. Sept. Purif. Technologie. 2012, 95, 1–9. [\[Référence croisée\]](#)
163. Chmaysssem, A. ; AlChoubassi, G. ; Taha, S. ; Hauchard, D. Procédé Electro-Fenton à l'échelle semi-pilote. Une étude pour étendre le réacteur aux applications industrielles.
Rés. Carré. 2023. [\[Référence croisée\]](#)
164. Parc, S. ; Lee, JW ; Popov, BN Un examen de la couche de diffusion de gaz dans les piles à combustible PEM : matériaux et conceptions. Int. J. Énergie hydrogène
2012, 37, 5850-5865. [\[Référence croisée\]](#)
165. Mukimin, A. ; Vistanty, H. ; Harihastuti, N. ; Setianingsih, NI ; Djayanti, S. ; Nilawati ; Astuti, Y. Réacteur et système hybride Fenton-électrochimique comme post-traitement
des eaux usées textiles. J. Ingénieur des procédés d'eau. 2024, 59, 105028. [\[Réf. croisée\]](#)
166. Zhu, C. ; Ang, NWJ ; Meyer, TH ; Qiu, Y. ; Ackermann, L. Électrochimie organique : synthèses moléculaires à potentiel. ACS
Cent. Sci. 2021, 7, 415-431. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
167. Sangsue, MC ; Lam, K. Un guide pratique de l'électrosynthèse. Nat. Rév. Chem. 2022, 6, 275-286. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
168. Botte, GG Fabrication électrochimique dans l'industrie chimique. Electrochimie. Soc. Interface 2014, 23, 49-55. [\[Référence croisée\]](#)
169. Wang, F. ; Li, W. ; Wang, R. ; Guo, T. ; Sheng, H. ; Fu, HC ; Stahl, SS ; Jin, S. Synthèse électrochimique modulaire utilisant un redox
Réservoir associé à des demi-réactions indépendantes. Joule 2020, 5, 149-165. [\[Référence croisée\]](#)
170. Cui, B. ; Shi, Y. ; Li, G. ; Chen, Y. ; Chen, W. ; Deng, Y. ; Hu, W. Défis et opportunités pour l'électrolyse de l'eau de mer : une mini-
revue sur les matériaux avancés en électrochimie impliquant le chlore. Wuli Huaxue Xuebao/Acta Phys.—Chim. Péché. 2022, 38, 2106010.
[\[Référence croisée\]](#)
171. Li, Q. ; Jensen, JO ; Bjerrum, NJ Chimie, électrochimie et applications électrochimiques | Aluminium. Dans l'Encyclopédie de
Sources d'énergie électrochimiques ; Elsevier Inc. : Amsterdam, Pays-Bas, 2009. [\[CrossRef\]](#)
172. Comer, BM ; Fuentes, P. ; Dimkpa, Colorado ; Liu, YH ; Fernandez, Californie ; Arora, P. ; Réalff, M. ; Singh, U. ; Hatzell, MC ; Medford, AJ
Perspectives et défis pour les engrais solaires. Joule 2019, 3, 1578-1605. [\[Référence croisée\]](#)
173. Fu, N. ; Sauer, GS ; Lin, S. Une approche électrocatalytique générale de la synthèse des diamines vicinales. Nat. Protocole. 2018, 13,
1725-1743. [\[Référence croisée\]](#)
174. Zheng, S. ; Yan, J. ; Wang, K. Progrès de la recherche en ingénierie sur la technologie des microréactions électrochimiques : une nouvelle méthode pour
Électrosynthèse de produits chimiques organiques. Ingénierie 2021, 7, 22-32. [\[Référence croisée\]](#)
175. Anastasiadou, D. Électrodes à base de Cu pour l'électrosynthèse de l'ammoniac et de l'urée. doctorat Thèse, Université de technologie d'Eindhoven,
Eindhoven, Pays-Bas, 2023.
176. Chen, X. ; Lv, S. ; Su, Z. ; Yang, X. ; Cui, H. ; Yang, Z. ; Xu, Z. ; Teobaldi, G. ; Kang, J. ; Liu, L.-M. ; et coll. Progrès récents dans les nanomatériaux amorphes pour la
synthèse électrochimique de composés contenant de l'azote. Chimique. Catal. 2024, 100871. [\[Réf. croisée\]](#)
177. Botte, GG Transition des technologies électrochimiques vers l'agriculture via la National Science Foundation Engineering Research
Modèle central. Electrochimie. Soc. Interface 2023, 32, 69-73. [\[Référence croisée\]](#)
178. Meyer, TH ; Choi, moi ; Tian, C. ; Ackermann, L. Propulser l'avenir : comment l'électrochimie peut-elle faire une différence dans le secteur organique
La synthèse? Chem 2020, 6, 2484-2496. [\[Référence croisée\]](#)
179. Talebi, M. ; Nematollahi, D. Synthèse électrochimique de dérivés sulfonamides : conditions d'électrosynthèse et voies de réaction. ChemElectroChem 2024, 11, e202300728.
[\[Référence croisée\]](#)
180. Zuo, S. ; Xue, W. ; Zhang, Y. ; Chen, J. ; Lin, Z. Couverture : Électrocatalyseurs à base de Fe dispersés atomiquement pour l'hydrogène
Synthèse de peroxyde (ChemNanoMat 2/2024). ChemNanoMat 2024, 10, 202400093. [\[CrossRef\]](#)
181. Zuo, S. ; Xue, W. ; Zhang, Y. ; Chen, J. ; Lin, Z. Électrocatalyseurs à base de motifs Fe dispersés atomiquement pour la synthèse du peroxyde d'hydrogène. ChemNanoMat
2024, 10, 202300476. [\[CrossRef\]](#)
182. Schremp, FW Prévention de la corrosion pour les plates-formes offshore. JPT J. Pet. Technologie. 1984, 36, 605-612. [\[Référence croisée\]](#)
183. Chen, Y. ; Lui, M. ; Zong, Y. ; Dong, S. ; Yan, Y. ; Zhang, Y. ; Liu, H. ; Cao, J. Progrès de la recherche sur les modes de défaillance des flexibles non liés
Tuyaux et leurs mesures de contrôle. Nat. Gaz. Ind. 2021, 41, 122-131. [\[Référence croisée\]](#)
184. Mahajanam, SPV ; Joosten, MW Lignes directrices pour la sélection des matériaux d'apport afin de minimiser la corrosion préférentielle des soudures dans les aciers pour
pipelines. Projet SPE. Facil. Constr. 2011, 6, 5-12. [\[Référence croisée\]](#)
185. Erdogan, C. ; Swain, G. Conception conceptuelle de protection cathodique d'anode sacrificielle pour les monopieux éoliens offshore. Océan Ing. 2021,
235, 109339. [\[Référence croisée\]](#)
186. Popov, BN Corrosion Engineering : principes et problèmes résolus ; Elsevier : Amsterdam, Pays-Bas, 2015. [\[CrossRef\]](#)
187. Ahmad, Z. Principes d'ingénierie de la corrosion et de contrôle de la corrosion ; Elsevier : Burlington, MA, États-Unis, 2006. [\[CrossRef\]](#)
188. Cicek, V. Ingénierie de la corrosion ; Wiley : Hoboken, New Jersey, États-Unis, 2014 ; ISBN 9781118720899. [\[Référence croisée\]](#)
189. Pyun, S.-I. Stratégies de protection contre la corrosion des métaux. ChemTexts 2020, 7, 2. [\[CrossRef\]](#)
190. Ducasse-Lapeyrusse, J. ; Bouteiller, V. ; Marie-Victoire, E. ; Bouichou, M. ; Damien, G. ; Martinet, V. ; Annede-Villeau, C. ; Lesieutre, O.
Bilan du système de protection cathodique à courant imposé après 4 ans d'exploitation : étude de cas du viaduc de Saint-Cloud (France). Goujon de cas. Constr. Maître.
2023, 18, e02023. [\[Référence croisée\]](#)
191. Xu, J. ; Yang, M. ; Li, S. ; Kainuma, S. ; Ji, B. ; Murayama, S. Application de la méthode de protection cathodique sur les structures en acier utilisant une anode sacrificielle et
un électrolyte hydrogel de polyacrylate de sodium-carboxyméthylcellulose de sodium (PANa – CMC). Goujon de cas.
Constr. Maître. 2024, 20, e02742. [\[Référence croisée\]](#)
192. Ramanavasu, R. ; Vijayakumar, K. ; Fernandez, SG Nanogrid intégré pour le système de protection cathodique à courant imposé dans une usine de dessalement. Durabilité
2023, 15, 7088. [\[CrossRef\]](#)

193. Yao, G. ; Lui, X. ; Liu, J. ; Guo, Z. ; Chen, P. Étude de test du mécanisme de protection contre la corrosion des câbles de pont basé sur Impressed Protection cathodique actuelle. *Lubrifiants* 2023, 11, 30. [\[CrossRef\]](#)
194. Dickinson, E.J.F.; Ekström, H. ; Fontes, E. COMSOL Multiphysics® : logiciel d'éléments finis pour l'analyse électrochimique. *UN Mini-revue. Électrochimie. Commun.* 2014, 40, 71-74. [\[Référence croisée\]](#)
195. Jalalvand, AR ; Roushani, M. ; Goicoechea, HC; Rutledge, DN; Gu, HW MATLAB en électrochimie : une revue. *Talante* 2018, 194, 205-225. [\[Référence croisée\]](#)
196. Weddle, P. ; Vincent, T. ; Kee, R.J. identifiant et appliquant des modèles d'espace d'état dérivés de modèles physiques haute fidélité de batteries Li-Ion. *Rencontre ECS. Résumé.* 2017, MA2017-01. [\[Référence croisée\]](#)
197. Bennett, B. ; Chang, J. ; Bard, A.J. Mécanisme de la réaction rédox Br⁻/Br₂ sur les électrodes de platine et de carbone vitreux dans le nitrobenzène par voltamétrie cyclique. *Électrochimie. Acta* 2016, 219, 1-9. [\[Référence croisée\]](#)
198. Habekost, A. Simulation et ajustement des courbes de voltamétrie et de chronoampérométrie cycliques de réactions électrochimiques avec différents mécanismes - Une perspective didactique. *Monde J. Chem. Educ.* 2019, 7, 53-64. [\[Référence croisée\]](#)
199. Wang, X. ; Wang, Z. Modules de simulation électrochimique animés. *J. Chem. Educ.* 2022, 99, 752-758. [\[Référence croisée\]](#)
200. Jaugstetter, M. ; Blanc, N. ; Kratz, M. ; Tschulik, K. Électrochimie sous confinement. *Chimique. Soc. Rév.* 2022, 51, 2491-2543. [\[Référence croisée\]](#)
201. Weiss, L.J.K.; Lubins, G. ; Musique, E. ; Rinklin, P. ; Banzet, M. ; Peng, H. ; Terkan, K. ; Mayer, D. ; Wolfrum, B. Électrochimie à impact unique en microfluidique sur papier. *ACS Sens.* 2022, 7, 884-892. [\[Référence croisée\]](#)
202. Zhou, Y. ; Qi, J. ; Engelberg, D.L. Sur l'application de l'électrochimie bipolaire pour simuler le comportement de corrosion galvanique des Aciers inoxydables différents. *Électrochimie. Commun.* 2021, 126, 107023. [\[Réf. croisée\]](#)
203. Tettey, F. ; Parupelli, Saskatchewan; Desai, S. Un examen des dispositifs biomédicaux : classification, directives réglementaires, facteurs humains, Logiciel en tant que dispositif médical et cybersécurité. *Bioméde. Maître. Appareils* 2023, 2, 316-341. [\[Référence croisée\]](#)
204. Marcus, H.J.; Payne, C.J.; Hughes-Hallett, A. ; Marcus, A.P. ; Yang, G.Z.; Darzi, A. ; Nandi, D. Approbation réglementaire de nouveaux médicaments Appareils : étude transversale. *BMJ* 2016, 353, i2587. [\[Référence croisée\]](#)
205. Wagner, M.V. ; Schanze, T. Comparaison des procédures d'approbation des dispositifs médicaux en Europe et aux États-Unis. *Curr. Réal. Bioméde. Ing.* 2019, 5, 605-608. [\[Référence croisée\]](#)
206. Robinson, S.G.; Sigman, M.S. Intégration d'outils d'analyse électrochimique et statistique pour la conception moléculaire et la compréhension mécaniste. *Acc. Chimique. Rés.* 2020, 53, 289-299. [\[Référence croisée\]](#)
207. Rivera, F.F.; Pérez, T. ; Castañeda, L.F.; Nava, J.L. Modélisation mathématique et simulation des réacteurs électrochimiques : une revue critique. *Chimique. Ing. Sci.* 2021, 239, 116622. [\[Réf. croisée\]](#)
208. Lu, S.-M. ; Vannoy, K.J.; Dick, J.E.; Long, Y.-T. Chimie multiphasique sous nanoconfinement : une perspective électrochimique. *J. Suis. Chimique. Soc.* 2023, 145, 25043-25055. [\[Référence croisée\]](#)
209. Ma, Z. ; Witteman, L. ; Wrubel, J.A.; Bender, G. Une méthode de modélisation complète pour l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons Développement. *Int. J. Hydrogène Énergie* 2021, 46, 17627-17643. [\[Référence croisée\]](#)
210. Iliev, I.K.; Gizzatulline, A.R. ; Filimonova, A.A.; Chichirova, N.D. ; Beloev, I.H. Simulation numérique de processus dans une cellule électrochimique à l'aide de COMSOL Multiphysics. *Énergies* 2023, 16, 7265. [\[CrossRef\]](#)
211. Yaoxuan, Q. ; Cheng, F. ; Kening, S. Simulation multiphysique d'une pile à combustible à oxyde solide basée sur la méthode Comsol. Dans *E3S Web de Conférences ; EDP Sciences : Paris, France, 2021 ; Volume 245.* [\[CrossRef\]](#)
212. Goel, V. ; Thornton, K. Activation de la simulation électrochimique d'électrodes de batterie Li-Ion avec tortuosité anisotrope dans COMSOL Multiphysique®. *MethodsX* 2021, 8, 101425. [\[CrossRef\]](#)
213. Salazar, P.F.; Kumar, S. ; Cola, B.A. Conception et optimisation de cellules thermo-électrochimiques. *J.Appl. Électrochimie.* 2013, 44, 325-336. [\[Référence croisée\]](#)
214. Yang, W. ; Soleil, L. ; Bao, J. ; Mo, Z. ; Du, M. ; Xu, Y. ; Zhang, J. Modélisation multiphysique du transfert de masse et de chaleur dans un thermo-Cellule électrochimique. *Ind. Ing. Chimique. Rés.* 2023, 62, 12345-12355. [\[Référence croisée\]](#)
215. El-Shafie, O.A. ; El-Maghraby, R.M. ; Albo, J. ; Fateen, S.E.K. ; Abdelghany, A. Modélisation et étude numérique des performances des électrodes à diffusion de gaz pour la réduction électrochimique du dioxyde de carbone en méthanol. *Ind. Ing. Chimique. Rés.* 2020, 59, 20929-20942. [\[Référence croisée\]](#)
216. Yang, F. ; Zhang, J. ; Guo, C. ; Zhao, S. Enquête sur l'usinage électrochimique pour une spirale profonde de forme spéciale à changement progressif Trou basé sur COMSOL. *Int. J. Adv. Fab. Technologie.* 2020, 108, 2717-2725. [\[Référence croisée\]](#)
217. Cordova-Huaman, A.V.; Jauja-Ccana, V.R. ; La Rosa-Toro, A. Potentiostat contrôlé par smartphone à faible coût basé sur Arduino pour l'enseignement des principes fondamentaux et des applications de l'électrochimie. *Héliyon* 2021, 7, e06259. [\[Référence croisée\]](#)
218. Ahmad, New Jersey ; Yakob, N. ; Bunyamin, M.A.H.; Winarno, N. ; Akmal, W.H. L'effet de l'animation et de la simulation interactives par ordinateur sur la réussite et la motivation des étudiants dans l'apprentissage de l'électrochimie. *J. Pendidik. IPA Indonésie.* 2021, 10, 311-324. [\[Référence croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.