



COMMENT LES CRISES GEOPOLITIQUES BOULEVERSENT-ELLES LA MOBILITE
MONDIALE ET COMMENT LIMITER LES FRAGILITES INVISIBLES DES BUS A
HYDROGENE LORS DES GRANDS EVENEMENTS INTERNATIONAUX AU MAROC

Ayat-Allah BOURAMDANE

Revue Francophone du Développement Durable

ISSN 2269-1464

2026 - n°27 - Mars

Pages 16 - 32.

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

BOURAMDANE A.A (2026), Comment les crises géopolitiques bouleversent-elles la mobilité internationale et comment limiter les fragilités invisibles des bus à hydrogène lors des grands événements internationaux au Maroc ?, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°27, Mars, p. 16 - 32.

Comment les crises géopolitiques bouleversent-elles la mobilité mondiale et comment limiter les fragilités invisibles des bus à hydrogène lors des grands événements internationaux au Maroc ?

Ayat-Allah BOURAMDANE¹

Résumé : Cet article analyse la manière dont les crises géopolitiques contemporaines redessinent profondément les dynamiques des réseaux de transport mondiaux, en transformant des infrastructures autrefois optimisées en ensembles désormais exposés à l'instabilité, aux ruptures et à la reconfiguration permanente. À travers les cas de la guerre Russie-Ukraine et des tensions autour du détroit d'Ormuz, il met en évidence les effets en cascade sur les chaînes logistiques globales, la hausse des coûts de l'énergie et la fragilisation des modes de mobilité routier, maritime et aérien. Dans ce contexte, le travail explore également la transition énergétique comme réponse structurelle à ces vulnérabilités, en soulignant ses propres limites et contradictions. L'introduction des technologies bas-carbone, notamment l'électrification et l'hydrogène, ne supprime pas les fragilités, mais les déplace vers des dimensions plus techniques, moins visibles et plus complexes à maîtriser. Dans cette dynamique, afin de transporter simultanément des milliers de supporters, délégations et bénévoles entre aéroports, stades et centres-villes – notamment lors de la Coupe d'Afrique des Nations 2025, de la Coupe du Monde FIFA 2030, ainsi que de grands festivals culturels, forums économiques internationaux et conférences climatiques – plusieurs villes marocaines pourraient envisager le déploiement progressif de bus à hydrogène. Cette solution émergente est susceptible de contribuer à une mobilité collective décarbonée, dans un contexte où l'écosystème industriel de l'hydrogène est encore en cours de structuration. L'étude se concentre sur le cas de ces bus à hydrogène mobilisés lors de grands événements internationaux au Maroc, où l'intensité d'utilisation met en lumière une série de mécanismes de dégradation des piles à combustible : instabilités de charge, déséquilibres des flux gazeux, contraintes thermiques, vieillissement des catalyseurs et gestion hydrique délicate. Ces phénomènes, souvent invisibles à l'échelle opérationnelle, révèlent la sensibilité des technologies de conversion d'énergie aux conditions réelles d'exploitation. Enfin, l'article met en perspective les solutions d'atténuation fondées sur le pilotage intelligent, la gestion thermique, l'optimisation de la consommation et l'intégration de l'intelligence artificielle. Il montre que la résilience des transports futurs repose moins sur la suppression des risques que sur leur anticipation dynamique. En définitive, cette recherche souligne que la mobilité du XXI^e siècle se construit dans un espace d'équilibre instable, où géopolitique, énergie et ingénierie s'entrelacent, et où la performance dépend désormais de la capacité à transformer l'incertitude en paramètre de conception plutôt qu'en simple contrainte subie.

Mots Clés: Crises géopolitiques, mobilité, hydrogène, chaînes logistiques, piles à combustible, dégradation.

Introduction

Les conflits géopolitiques contemporains ne se limitent plus aujourd'hui aux seules dimensions militaires ou diplomatiques ; elles affectent désormais l'ensemble des chaînes logistiques mondiales qui assurent la circulation des marchandises, des passagers, de l'énergie et des matières premières (Bouramdane, 2023a). Depuis le déclenchement de la guerre Russie-Ukraine en 2022 ainsi que l'intensification des tensions stratégiques autour du détroit d'Ormuz au Moyen-Orient en 2026,

¹ ayatallahbouramdane95@gmail.com

l'organisation mondiale des transports connaît une transformation structurelle majeure touchant simultanément le transport routier, ferroviaire, maritime et aérien.

La guerre Russie-Ukraine a d'abord provoqué un choc énergétique majeur. Avant 2022, une grande partie des échanges commerciaux entre l'Europe et l'Asie transitait par la Russie via les corridors terrestres ferroviaires et routiers. Les sanctions, les contrôles douaniers renforcés et les risques géopolitiques ont réduit fortement l'utilisation de ces routes. Les opérateurs logistiques ont dû développer des itinéraires alternatifs. Cette reconfiguration des chaînes logistiques a augmenté les temps de transit et les coûts de transport dans tous les modes de mobilité (OECD, , 2023 ; IEA, 2022).

Les tensions autour du détroit d'Ormuz représentent un second facteur de déstabilisation majeur pour le transport mondial. Ce passage maritime stratégique constitue l'un des principaux corridors énergétiques mondiaux. Environ 20 millions de barils de pétrole transitent quotidiennement par ce détroit, soit près d'un quart du commerce mondial de pétrole transporté par voie maritime (IEA, 2026, Bouramdane, 2026a ; U.S. EIA, 2024). Toute perturbation du détroit d'Ormuz provoque immédiatement une hausse des prix du pétrole, du gaz naturel liquéfié et des coûts de transport mondiaux. Les tensions militaires récentes ont entraîné une réduction importante du trafic maritime dans la région, une augmentation des primes d'assurance maritime et un redéploiement des routes commerciales. Plusieurs navires ont été contraints d'éviter certaines zones jugées dangereuses, ce qui rallonge les trajets et augmente la consommation de carburant (Bouramdane, 2026b ; UNCTAD, 2026 ; Hill, 2026).

Le secteur du transport routier de marchandises est indirectement affecté par ces tensions maritimes car l'augmentation des prix du pétrole se répercute immédiatement sur le diesel utilisé par les camions de fret et les véhicules utilitaires lourds. Les entreprises de logistique voient leurs marges diminuer tandis que les consommateurs subissent une augmentation du coût final des biens transportés. Les chaînes d'approvisionnement « juste-à-temps » deviennent plus fragiles car les retards maritimes se propagent ensuite vers les réseaux routiers et ferroviaires.

Il est important de noter que l'impact des guerres comme le conflit Russie-Ukraine ou les tensions dans le détroit d'Ormuz n'est pas exactement le même sur le diesel et sur l'essence, même si les deux carburants sont fortement affectés. Le diesel est généralement beaucoup plus sensible aux crises géopolitiques dans le secteur du transport routier, car il constitue le carburant dominant pour les activités économiques et logistiques lourdes (c.-à-d. le transport alimentaire, les livraisons industrielles, les matériaux de construction, les transports publics, les ports et les plateformes logistiques). L'essence, en revanche, est surtout consommée par les voitures particulières et les petits véhicules légers. Ainsi, lorsque les guerres perturbent les

marchés pétroliers mondiaux, des pénuries locales ou une hausse rapide des prix du diesel provoquent un effet inflationniste beaucoup plus sévère que pour l'essence.

Le transport aérien est également fortement impacté par la hausse du kérosène et par les restrictions d'espace aérien imposées par les conflits, obligeant les compagnies à effectuer des détours plus longs qui augmentent la consommation de carburant, les temps de vol et le prix des billets. Cette situation s'explique notamment par le fait que le kérosène n'est pas extrait directement du sous-sol, mais qu'il est produit dans les raffineries à partir du pétrole brut. Ainsi, lorsque les guerres perturbent l'approvisionnement mondial en pétrole ou compliquent son transport maritime à travers des corridors stratégiques comme le détroit d'Ormuz, les raffineries reçoivent moins de matière première et doivent réduire leur production de carburants, y compris le kérosène. En parallèle, les stocks mondiaux de kérosène – utilisés pour absorber temporairement les chocs d'approvisionnement – diminuent rapidement, surtout lorsque la demande aérienne reste élevée durant les périodes de forte mobilité comme la saison estivale. Cette combinaison entre raréfaction du pétrole brut, baisse de production des raffineries et forte demande aérienne entraîne une hausse importante du prix du carburant aérien et augmente directement les coûts d'exploitation des compagnies aériennes.

Pour faire face aux crises affectant le transport routier, les solutions reposent avant tout sur une réduction progressive de la dépendance au pétrole, particulièrement vulnérable aux tensions géopolitiques qui influencent directement les prix de l'essence et du diesel. À court terme, le renforcement des réserves stratégiques de carburants permet de limiter temporairement les risques de pénurie, tandis que des dispositifs de stabilisation des prix contribuent à atténuer les hausses soudaines des coûts à la pompe. À moyen et long terme, la transformation du secteur repose sur une diminution structurelle de la consommation de carburants fossiles grâce à l'accélération de l'électrification des véhicules légers et des poids lourds, avec le remplacement progressif des moteurs thermiques par des moteurs électriques alimentés par batteries (Bouramdane, 2026c ; Bouramdane, 2024 ; Bouramdane, 2024b), ainsi qu'au développement des infrastructures de recharge (Bouramdane, 2025a). Cette transition inclut également le développement de l'hydrogène comme vecteur énergétique alternatif (Bouramdane, 2025b ; Bouramdane, 2024c), notamment à travers les bus à hydrogène destinés aux transports collectifs de grande capacité lors des grands événements internationaux. Le renforcement du transport collectif et l'optimisation du fret par une logistique plus efficace permettant de réduire les trajets inutiles jouent également un rôle central dans cette transformation. Le transfert d'une partie du transport de marchandises vers le rail, moins énergivore que le transport routier, contribue par ailleurs à réduire la pression exercée sur la consommation mondiale de diesel. Enfin, la diversification des corridors logistiques devient une priorité stratégique pour de nombreux États et opérateurs de transport afin de limiter

la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement face aux crises géopolitiques et énergétiques (Bouramdane, 2025c ; Bouramdane, 2026d).

Parallèlement, l'amélioration de l'efficacité énergétique des navires (Bouramdane, 2025d ; Bouramdane, 2025e) constitue un levier essentiel de réduction de la consommation énergétique globale du secteur du transport maritime.

Dans le secteur aérien, les possibilités d'adaptation restent plus limitées en raison de l'absence actuelle d'alternative directe et généralisable au kérosène pour les vols commerciaux de moyenne et longue distance. À court terme, les compagnies aériennes cherchent principalement à maîtriser leurs coûts à travers la constitution de stocks stratégiques lorsque les prix du carburant sont plus faibles, l'utilisation de mécanismes de couverture financière afin de réduire l'exposition aux fluctuations des marchés pétroliers, ainsi que l'optimisation des itinéraires et de la consommation énergétique des appareils. À moyen terme, la diversification des sources d'approvisionnement en carburéacteur permet de réduire partiellement la dépendance aux corridors pétroliers sensibles aux tensions géopolitiques. À plus long terme, le développement des carburants d'aviation durables produits à partir de biomasse, de déchets ou de carburants synthétiques, ainsi que l'émergence progressive de technologies hybrides et électriques pour les vols courts, ouvre des perspectives de réduction progressive de la dépendance au pétrole. Toutefois, dans des pays caractérisés par de très grandes distances intérieure, où l'aviation joue un rôle essentiel dans la connectivité territoriale, cette transition apparaît davantage comme une transformation graduelle du système aérien que comme un remplacement rapide des carburants fossiles.

Dans le contexte marocain, les bus à hydrogène – un véhicule de transport collectif utilisant une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène pour produire de l'électricité, laquelle alimente ensuite un moteur électrique – apparaissent comme une solution stratégique pour assurer le transport de foules massives lors des grands événements organisés au Maroc, notamment les compétitions sportives internationales telles que la Coupe d'Afrique des Nations 2025 et la Coupe du Monde 2030, les festivals culturels comme le Festival Mawazine à Rabat, le Festival International du Film de Marrakech, le Festival Gnaoua d'Essaouira, le Festival de Fès des Musiques Sacrées du Monde et le Festival de la Culture Soufie et des Sagesses du Monde, ainsi que les sommets économiques internationaux et les futures conférences climatiques africaines. Grâce à leur grande capacité de transport, leur fonctionnement silencieux et leur faible impact environnemental, ces bus peuvent contribuer à fluidifier la mobilité urbaine tout en réduisant les émissions polluantes liées aux déplacements massifs de visiteurs, de supporters, d'artistes et de délégations internationales. Cependant, cette technologie présente également plusieurs limites importantes. Les coûts de production, de stockage et de distribution de l'hydrogène restent encore élevés (Bouramdane, 2023b), tandis que les infrastructures de ravitaillement demeurent limitées, notamment parce que l'écosystème industriel de l'hydrogène est encore en phase de développement au Maroc et n'a pas atteint un

niveau de maturité suffisant pour un déploiement massif (Bouramdane, 2026e ; Bouramdane, 2026f). De plus, l'utilisation intensive des bus à hydrogène lors d'événements de grande ampleur peut accélérer la dégradation des piles à combustible en raison des cycles fréquents de démarrage et d'arrêt, des fortes variations de charge, des températures élevées et des longues heures de fonctionnement continu, ce qui peut réduire progressivement les performances, l'efficacité énergétique et la durée de vie des systèmes électrochimiques embarqués.

Comprendre les mécanismes de dégradation des bus à hydrogène ainsi que les solutions d'atténuation devient alors essentiel pour garantir la fiabilité du service lors de ces manifestations d'envergure.

Quand les bus à hydrogène dansent avec les foules : l'usure invisible derrière les grands événements au Maroc

Imagine qu'on se trouve dans une grande ville marocaine, pendant un événement immense comme la Coupe d'Afrique des Nations 2025 ou la Coupe du Monde 2030. Les rues sont pleines de monde, les bus à hydrogène roulent sans bruit pour transporter des milliers de personnes vers les stades, les festivals comme Mawazine ou le Festival Gnaoua, ou encore vers les sommets économiques et climatiques. Tout semble fonctionner parfaitement... mais à l'intérieur du bus, quelque chose d'invisible commence doucement à s'abîmer.

Dans le cœur du bus à hydrogène, il y a une pièce essentielle appelée pile à combustible. On peut l'imaginer comme une "machine silencieuse" qui fabrique de l'électricité à partir de deux éléments simples : l'hydrogène et l'oxygène de l'air. Mais contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces deux gaz ne se mélangent jamais directement. Tout le fonctionnement repose sur un contrôle très précis, presque comme un système de "circulation organisée". À l'intérieur, la pile est construite en couches très fines. D'un côté, on fait circuler l'hydrogène. De l'autre côté, on fait circuler l'air, qui contient l'oxygène. Entre les deux, il y a une membrane spéciale, très fine, qui joue un rôle de filtre intelligent : elle laisse passer uniquement certaines particules issues de l'hydrogène (les protons), mais bloque les gaz eux-mêmes. Pendant ce temps, les électrons, eux, ne peuvent pas traverser cette membrane et sont obligés de passer par un circuit extérieur. C'est ce déplacement des électrons qui crée le courant électrique utilisé pour faire avancer le bus. Le système fonctionne bien lorsque les flux de gaz sont stables et réguliers. Mais lors des grands événements au Maroc, comme la CAN 2025 ou la Coupe du Monde 2030, les bus sont confrontés à des conditions très difficiles : embouteillages autour des stades, arrêts fréquents entre les fan zones, accélérations soudaines pour rattraper des retards, ou encore circulation dense pendant les festivals à Rabat, Marrakech ou Essaouira.

Dégradation par transitoires de charge (load cycling)

Dans ces conditions, le premier mécanisme important de dégradation est la dégradation par transitoires de charge (load cycling). Cela signifie que la pile ne fonctionne pas à puissance constante, mais passe sans arrêt d'un état à un autre : repos, faible puissance, forte puissance, puis retour au repos. Par exemple, lorsqu'un bus transporte des supporters après un match, il peut avancer lentement dans les embouteillages, puis accélérer brusquement pour quitter une zone congestionnée, puis ralentir à nouveau. Ces changements rapides obligent la pile à s'adapter en permanence. À chaque variation, les réactions chimiques internes doivent se réorganiser très vite, ce qui crée des contraintes répétées sur les matériaux. Avec le temps, ces cycles répétés fatiguent la structure interne, un peu comme un objet que l'on plie et déplie sans arrêt jusqu'à ce qu'il s'use.

Dégradation en régime transitoire par maldistribution des réactifs (hydrogène/oxygène)

Dans ces conditions, les flux d'hydrogène et d'air deviennent instables parce que la pile à combustible ne reçoit pas les gaz de manière "magique" et instantanée : ils arrivent par tout un réseau de tuyaux, de valves, de compresseurs et de capteurs qui doivent ajuster en permanence les débits.

Par exemple, lorsqu'un bus redémarre après un arrêt dans un embouteillage – ce qui est très fréquent pendant des événements comme la CAN 2025 ou la Coupe du Monde 2030 autour des stades ou des zones de festival – la demande en puissance change brutalement. Le conducteur appuie sur l'accélérateur, et en quelques secondes, le système doit passer d'un mode "repos" à un mode "forte puissance".

Pour répondre à cette demande, un composant appelé système de gestion de l'air (avec compresseur) et un autre appelé régulateur d'hydrogène doivent augmenter très rapidement les débits. Mais ces systèmes ont une inertie physique : un compresseur met un petit temps à accélérer, les vannes mettent un petit temps à s'ouvrir complètement, et les capteurs doivent d'abord mesurer, puis corriger, puis re-mesurer. Tout cela crée un léger décalage dans le temps.

Pendant ce court décalage, la pile ne reçoit pas exactement ce dont elle a besoin. Par exemple, dans certaines zones internes, l'hydrogène arrive plus vite que l'oxygène ne peut être fourni par l'air comprimé. Dans d'autres zones, c'est l'inverse : l'air arrive mieux que l'hydrogène. Cela crée donc des "déséquilibres temporaires de distribution".

Ainsi, ce n'est pas seulement la "quantité totale" d'hydrogène et d'air qui pose problème, mais surtout la manière dont ils arrivent dans le temps et dans l'espace à l'intérieur de la pile. C'est ce décalage entre la demande instantanée du bus et la réponse physique des systèmes d'alimentation qui rend les flux instables lors des redémarrages fréquents.

Dégradation par maldistribution des réactifs

Ce déséquilibre crée un phénomène important : certaines parties de la pile travaillent beaucoup plus que d'autres. Là où il y a trop d'hydrogène ou trop d'oxygène, les réactions chimiques deviennent plus intenses et plus rapides que prévu. À l'inverse, dans les zones où les gaz arrivent mal, la réaction devient faible ou incomplète. Cela entraîne une utilisation inégale de la surface active de la pile, ce qui provoque une usure progressive et non uniforme.

Dégradation par starvation locale en oxygène ou en hydrogène

Un autre problème plus subtil apparaît lorsque le bus demande soudainement beaucoup de puissance, par exemple lorsqu'il est rempli de passagers et qu'il doit accélérer fortement pour quitter une zone saturée. Dans ces moments-là, la réaction chimique à l'intérieur de la pile consomme de l'oxygène très rapidement. Si l'air n'est pas fourni assez vite, certaines zones internes se retrouvent temporairement en manque d'oxygène. La pile entre alors dans un fonctionnement instable : elle continue de produire de l'électricité, mais dans des conditions moins efficaces et plus stressantes pour les matériaux.

Ce manque d'oxygène localisé, combiné aux variations de flux d'hydrogène, provoque des contraintes répétées sur les composants internes. La membrane doit travailler plus intensément pour compenser les déséquilibres, et les matériaux qui supportent les réactions chimiques sont sollicités de manière irrégulière. Avec le temps, cette répétition de micro-déséquilibres fragilise progressivement la structure interne de la pile.

Ainsi, même si tout semble fonctionner normalement à l'extérieur du bus, à l'intérieur de la pile à combustible, ces variations invisibles – flux de gaz irréguliers, déséquilibres entre hydrogène et oxygène, et périodes de manque temporaire d'oxygène – s'accumulent lentement et contribuent à réduire la performance et la durée de vie du système.

Ensuite, il existe un autre mécanisme important appelé dégradation thermique (ou vieillissement accéléré par élévation de température). Ce phénomène apparaît lorsque le bus fonctionne longtemps à forte puissance, par exemple après un match de la CAN 2025 ou un grand concert à Marrakech, quand il doit transporter en continu une très grande quantité de passagers sans véritable période de repos.

Dans ce cas, la pile à combustible est fortement sollicitée pendant une longue durée. Elle doit produire beaucoup d'électricité sans interruption, ce qui signifie que les réactions chimiques internes s'intensifient en permanence. Or, ces réactions ne sont pas parfaitement efficaces : une partie de l'énergie se transforme en chaleur. Plus la demande est élevée et prolongée, plus cette chaleur s'accumule à l'intérieur du système.

Élévation progressive de la température interne

Lorsque cette chaleur ne peut pas être évacuée assez rapidement par le système de refroidissement, la température interne de la pile augmente progressivement. Cela peut arriver dans des conditions réelles d'exploitation intense, par exemple dans des embouteillages prolongés autour des stades ou lors de rotations continues entre plusieurs sites d'événements.

Cette augmentation de température n'est pas uniforme : certaines zones de la pile chauffent plus que d'autres, notamment celles où les réactions chimiques sont les plus actives. Cela crée des "points chauds" qui accentuent encore les déséquilibres internes.

Accélération du vieillissement des matériaux

Sous l'effet de cette chaleur prolongée, les matériaux internes de la pile commencent à se dégrader plus rapidement. La membrane qui sépare les gaz peut perdre progressivement de ses propriétés, devenant moins efficace pour assurer une séparation parfaite entre hydrogène et oxygène. De même, les catalyseurs qui facilitent les réactions chimiques peuvent perdre en performance, comme s'ils devenaient moins "actifs" avec le temps.

Les supports en carbone et les structures internes sont également sensibles à ces températures élevées. La chaleur répétée peut les fragiliser progressivement, réduisant leur capacité à maintenir correctement les éléments actifs de la pile.

Dégradation thermo-induite en régime de forte charge

Ainsi, ce phénomène est qualifié de dégradation thermo-induite en régime de forte charge, car il ne dépend pas d'un dysfonctionnement ponctuel, mais d'un fonctionnement prolongé à haute puissance. Plus le bus est sollicité longtemps sans pause, plus la température interne augmente, et plus le vieillissement des composants s'accélère.

Conséquence globale

Au final, même si le bus continue de fonctionner normalement à court terme, cette accumulation de chaleur agit comme un vieillissement invisible : elle réduit progressivement l'efficacité de la pile à combustible, diminue sa durée de vie et augmente la probabilité de pertes de performance lors des futurs cycles d'utilisation intensive.

Dégradation par cycles de puissance et vieillissement du catalyseur (platine)

Pendant les grands événements, un autre mécanisme important apparaît : la dégradation liée aux variations rapides de puissance, aussi appelée fatigue par cyclage de charge (power cycling). Le bus ne fonctionne pas de manière stable, mais alterne constamment entre plusieurs états : lente circulation dans les embouteillages,

accélération soudaine pour quitter une zone saturée, forte sollicitation lorsqu'il est plein, puis retour au repos. Ces changements se répètent de façon très fréquente, parfois en quelques minutes seulement.

À chaque variation, la pile à combustible doit adapter immédiatement son fonctionnement interne. Cela signifie que les réactions chimiques accélèrent, ralentissent, puis réaccélèrent sans arrêt. Ce comportement crée une sorte de "stress mécanique et électrochimique" sur les composants internes, comme si le système était constamment en train de s'ajuster sans jamais se stabiliser. À long terme, cela fatigue les matériaux, un peu comme une feuille de papier qu'on plie et déplie des milliers de fois jusqu'à ce qu'elle perde sa solidité.

Vieillesse et agglomération des particules de platine

Un effet encore plus spécifique concerne les particules de platine, qui sont essentielles au bon fonctionnement de la pile. Le platine agit comme un catalyseur : il permet aux réactions entre l'hydrogène et l'oxygène de se produire plus facilement et plus rapidement.

Cependant, sous l'effet des variations répétées de puissance, ces particules de platine sont soumises à des conditions instables. Elles peuvent se déplacer légèrement, se détacher de leur support ou encore se regrouper entre elles. Ce phénomène est appelé agglomération (ou sintering). Lorsqu'elles s'agglutinent, la surface active disponible pour les réactions diminue, ce qui réduit progressivement l'efficacité de la pile.

Dégradation par cyclage de charge et désactivation du catalyseur

Ainsi, ce mécanisme est connu sous le nom de dégradation par cyclage de charge (power cycling degradation) combinée à une désactivation progressive du catalyseur de platine. Il résulte directement des changements fréquents de régime de fonctionnement, qui empêchent la pile de rester dans des conditions stables.

Conséquence globale

Au final, même si le bus continue de fonctionner normalement, ces cycles répétés de montée et de descente en puissance entraînent une fatigue progressive des structures internes et une perte d'efficacité du catalyseur, ce qui diminue lentement les performances globales de la pile à combustible sur le long terme.

Dégradation par déséquilibre hydrique (water management imbalance)

En plus des autres mécanismes, un phénomène très important apparaît lors des fortes sollicitations du bus : la gestion de l'eau à l'intérieur de la pile à combustible devient difficile à stabiliser. Ce phénomène est appelé dégradation par déséquilibre hydrique, ou plus largement water management degradation.

À l'intérieur de la pile, de l'eau est constamment produite comme "sous-produit" de la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène. Cette eau n'est pas anodine : elle joue un

rôle essentiel, car elle permet de maintenir la membrane humide, condition indispensable pour que les protons puissent circuler correctement et donc pour que la pile fonctionne efficacement.

Excès d'eau (inondation des canaux)

Lors des périodes de forte demande, par exemple quand le bus transporte beaucoup de passagers dans des conditions urbaines très denses, la production d'eau augmente rapidement. Si le système d'évacuation n'arrive pas à suivre, cette eau peut s'accumuler dans certains canaux de la pile.

On parle alors de flooding (inondation). Dans ce cas, l'eau bloque partiellement le passage de l'oxygène dans les canaux d'air, ce qui réduit la quantité de réactif disponible. La réaction devient alors moins efficace, comme si certaines parties de la pile "respiraient mal".

Manque d'eau (dessèchement de la membrane)

À l'inverse, dans d'autres situations – notamment lors de variations rapides de charge ou de forte ventilation – l'eau peut être évacuée trop rapidement. La membrane peut alors devenir trop sèche.

Or, une membrane sèche perd sa capacité à transporter efficacement les protons. Cela augmente la résistance interne de la pile et diminue la production d'électricité. C'est comme un matériau qui devient rigide et fonctionne moins bien parce qu'il manque d'humidité.

Dégradation par déséquilibre hydrique

Ainsi, le fonctionnement optimal de la pile dépend d'un équilibre très fin entre excès et manque d'eau. Lorsque cet équilibre est perturbé de manière répétée – ce qui arrive souvent lors des cycles arrêt/redémarrage et des fortes variations de charge pendant les grands événements – cela entraîne une dégradation progressive des performances.

Conséquence globale

Même si le bus continue de fonctionner normalement à l'extérieur, ces déséquilibres internes invisibles réduisent progressivement l'efficacité de la pile à combustible, augmentent les pertes énergétiques et accélèrent le vieillissement des composants.

Quand on regarde tous ces problèmes ensemble, on peut les imaginer comme plusieurs façons différentes d'user la même machine. D'abord, il y a les problèmes liés aux changements rapides de fonctionnement, quand le bus accélère, ralentit ou redémarre sans cesse : c'est le load cycling, qui fatigue la pile comme un objet qu'on plie et déplie trop souvent. Ensuite, il y a les problèmes de distribution des gaz, quand l'hydrogène et l'oxygène n'arrivent pas bien partout ou pas au bon moment : cela crée des zones où la pile travaille trop ou pas assez, avec parfois un manque temporaire

d'un gaz essentiel. À cela s'ajoute le problème de chaleur, quand le bus roule longtemps à forte puissance et que la pile chauffe trop, ce qui accélère le vieillissement des matériaux comme si la machine tournait toujours "à fond". Il y a aussi l'usure liée aux variations répétées de puissance, qui abîment petit à petit les particules de platine essentielles aux réactions chimiques, un peu comme des outils qui deviennent moins efficaces à force d'être trop sollicités. Enfin, il existe le problème de gestion de l'eau, quand la pile devient trop humide ou trop sèche, ce qui perturbe son fonctionnement comme une plante qui ne reçoit ni la bonne quantité d'eau ni au bon moment. Tous ces mécanismes sont différents, mais ils se combinent dans la réalité, surtout lors des grands événements où les bus sont utilisés intensivement et sans pause.

En plus des problèmes déjà décrits, il existe d'autres façons plus discrètes mais tout aussi importantes qui abîment la pile à combustible, comme si plusieurs petites "maladies invisibles" travaillaient en même temps. Par exemple, certaines petites particules de platine peuvent non seulement se regrouper, mais aussi se dissoudre dans l'eau à l'intérieur de la pile, puis se redéposer ailleurs de manière désordonnée, ce qui rend les réactions chimiques moins efficaces. En même temps, la membrane centrale peut être attaquée petit à petit par des substances très réactives, ce qui la fragilise et peut la rendre moins étanche avec le temps. Il y a aussi les supports en carbone, qui peuvent se corroder lentement et perdre leur solidité, un peu comme une structure qui commence à s'effriter. À cela s'ajoutent des moments où certaines zones de la pile subissent trop de "pression électrique", ce qui accélère l'usure, et des cas où de petites impuretés entrent dans le système et bloquent certaines réactions importantes. Ainsi, même si chaque problème semble petit pris séparément, leur accumulation agit comme plusieurs petites fissures qui, ensemble, finissent par affaiblir progressivement toute la pile à combustible.

Préserver les bus à hydrogène sous forte sollicitation : stratégies d'atténuation et pilotage intelligent lors des grands événements au Maroc

Imagine qu'on est encore au Maroc, pendant un de ces grands moments où tout le pays devient un immense réseau vivant : la CAN 2025, la Coupe du Monde 2030, les concerts de Mawazine, les projections du Festival International du Film de Marrakech, les rythmes du Festival Gnaoua d'Essaouira, ou encore les grandes conférences climatiques et économiques. Les bus à hydrogène circulent partout pour transporter des foules énormes. Mais cette fois, on va voir comment on peut les aider à ne pas s'abîmer trop vite, comme si on leur donnait une sorte de "super protection invisible".

D'abord, les ingénieurs comprennent que la pile à combustible n'aime pas les variations brusques de fonctionnement : les arrêts fréquents, les redémarrages rapides, les accélérations soudaines ou les freinages répétés créent des contraintes internes importantes. Pour réduire ce stress, ils conçoivent donc des systèmes de contrôle qui "apprennent" au bus à fonctionner de manière plus douce et plus régulière.

Concrètement, cela passe par une gestion intelligente de l'accélération et de la puissance. Au lieu de répondre immédiatement et fortement à une pression sur la pédale, le système électronique du bus introduit une transition progressive. Par exemple, si le conducteur demande une accélération rapide, le système va lisser cette demande dans le temps : la puissance augmente par paliers très rapides mais contrôlés, plutôt que d'un seul coup. Cela évite les variations brutales de consommation d'hydrogène et d'oxygène à l'intérieur de la pile, ce qui limite les déséquilibres internes.

Cette stratégie agit aussi sur les phases de freinage et de circulation en embouteillage. Le bus peut anticiper les ralentissements grâce à des capteurs (trafic, distance, GPS) et commencer à réduire ou stabiliser sa puissance avant même l'arrêt complet. Cela permet d'éviter les alternances trop fréquentes entre "forte demande" et "repos total", qui sont particulièrement fatigantes pour les composants internes.

En parallèle, les ingénieurs utilisent des algorithmes de gestion énergétique qui maintiennent la pile dans une zone de fonctionnement stable, souvent appelée zone de rendement optimal. L'idée est d'éviter les extrêmes : ni trop faible puissance (où la pile devient inefficace), ni trop forte (où elle chauffe et s'use plus vite). Le système essaie donc de garder un rythme régulier, comme un moteur qui tourne "calmement mais efficacement" plutôt que par à-coups.

On peut comparer cela à un coureur : au lieu de lui demander de sprinter, s'arrêter, repartir puis sprinter encore, on lui apprend à garder une allure constante. Il dépense ainsi moins d'énergie inutilement, se fatigue moins vite et peut courir plus longtemps sans se blesser. De la même manière, en "adoucis-sant" les variations de fonctionnement, le bus protège sa pile à combustible et prolonge sa durée de vie, surtout dans des contextes exigeants comme les grands événements où la circulation est imprévisible.

Ensuite, un autre point crucial concerne la chaleur. Quand les bus à hydrogène fonctionnent intensément pendant de grands événements, ils doivent transporter beaucoup de passagers sur de longues périodes, avec des arrêts fréquents et parfois des accélérations répétées. Dans ces conditions, la pile à combustible produit naturellement de la chaleur, car une partie de l'énergie chimique de l'hydrogène ne se transforme pas entièrement en électricité.

Pour éviter que cette chaleur ne s'accumule, les ingénieurs installent des systèmes de refroidissement très sophistiqués. On peut les imaginer comme un réseau invisible de circulation de fraîcheur à l'intérieur du bus. Il y a des circuits où circule un liquide spécial, un peu comme de l'eau très contrôlée, qui absorbe la chaleur au contact des composants les plus chauds. Ensuite, cette chaleur est transportée vers des radiateurs, où elle est dissipée dans l'air, un peu comme quand on souffle sur une soupe chaude pour la refroidir.

En parallèle, des ventilateurs et des capteurs surveillent en permanence la température en différents points de la pile. Dès qu'une zone commence à chauffer plus que les autres, le système réagit automatiquement en augmentant le refroidissement local. Cela permet d'éviter la formation de "points chauds", c'est-à-dire des zones où la température serait trop élevée et accélérerait le vieillissement des matériaux.

L'objectif est de maintenir la pile dans une plage de température stable, ni trop froide ni trop chaude, car c'est dans cet équilibre qu'elle fonctionne le mieux et s'abîme le moins vite. Sans cette régulation, la chaleur s'accumulerait petit à petit et fragiliserait les composants internes, même si le bus continue de fonctionner normalement à court terme.

On peut comparer ce système à un corps humain qui transpire pour se refroidir : tant que le mécanisme fonctionne bien, la température reste stable malgré l'effort. Mais si la chaleur n'est plus évacuée correctement, la fatigue s'installe progressivement sans être immédiatement visible.

Mais aujourd'hui, un élément encore plus puissant vient renforcer cette protection : l'intelligence artificielle. On peut l'imaginer comme un "cerveau numérique" invisible qui surveille tous les bus en même temps, comme s'il observait une grande ville depuis le ciel sans jamais se fatiguer.

Ce cerveau reçoit en continu une énorme quantité d'informations venant des capteurs installés dans les bus. Il lit la température de la pile à combustible, la vitesse du véhicule, la quantité d'hydrogène consommée, le nombre d'arrêts, les accélérations, les vibrations, et même les conditions de circulation autour des grands événements. Tout cela forme une sorte de grande "carte vivante" du comportement des bus en temps réel.

Mais son rôle ne se limite pas à observer : il comprend et anticipe. Grâce à l'analyse de toutes ces données, il peut repérer de très petits signes qui annoncent un problème futur. Par exemple, il peut détecter qu'un bus commence à chauffer un peu plus souvent que les autres lorsqu'il circule entre un stade et une fan zone très fréquentée. Même si le bus fonctionne encore normalement, l'intelligence artificielle comprend que cette répétition peut devenir dangereuse à long terme.

Dans ce cas, elle peut agir avant que la situation ne s'aggrave. Elle peut modifier automatiquement l'itinéraire du bus pour éviter les zones trop congestionnées, ou organiser une pause dans un endroit plus calme pour laisser le système refroidir et se stabiliser. De la même manière, si elle observe des signes précoces de fatigue dans une pile à combustible, elle peut recommander un passage anticipé en maintenance, avant qu'une panne réelle ne se produise.

On peut aussi comparer ce système à un médecin très attentif qui surveille en permanence la santé du bus. Au lieu d'attendre que le problème apparaisse, il agit dès les premiers signes faibles, parfois invisibles pour un humain. Cela permet non

seulement d'éviter les pannes, mais aussi de réduire l'usure progressive des composants en adaptant en permanence la manière dont les bus sont utilisés pendant les grands événements.

Pour éviter les problèmes liés à l'eau à l'intérieur de la pile à combustible, les ingénieurs mettent en place des systèmes de gestion très précis qui surveillent en permanence l'humidité et la circulation de l'eau. En effet, à l'intérieur de la pile, l'eau n'est pas seulement un résidu : elle est indispensable pour permettre le bon fonctionnement de la membrane, qui doit rester dans un état ni trop sec ni trop humide.

Ces systèmes agissent un peu comme un mécanisme de respiration contrôlée. Ils régulent en continu la quantité d'eau présente dans les canaux internes de la pile : si l'eau commence à s'accumuler, des dispositifs d'évacuation se déclenchent pour éviter l'inondation des passages de gaz ; à l'inverse, si la pile devient trop sèche, d'autres mécanismes retiennent ou redistribuent l'humidité pour réhydrater la membrane. L'objectif est de maintenir un équilibre très fin, car même un léger désajustement peut réduire l'efficacité des réactions chimiques.

L'intelligence artificielle joue ici un rôle important en complément de ces systèmes physiques. Grâce aux données collectées en temps réel – température, charge du bus, durée des trajets, niveau de production d'eau – elle peut anticiper les moments où cet équilibre risque d'être perturbé. Par exemple, elle peut prévoir qu'après plusieurs heures de circulation intensive lors d'un grand événement, la pile risque de produire trop d'eau, ou au contraire de se dessécher en raison d'une forte ventilation ou de variations rapides de puissance.

Dans ces cas, elle ajuste à l'avance les paramètres de fonctionnement, comme la ventilation, la température ou les débits de gaz, afin d'éviter que le déséquilibre ne s'installe. On peut comparer cela à un système très intelligent qui "sent" les besoins en eau du bus avant même que les problèmes apparaissent, et qui corrige en continu pour maintenir un environnement interne stable.

Conclusion

Au terme de cette analyse, une idée centrale s'impose : les crises géopolitiques contemporaines et les contraintes techniques des systèmes énergétiques ne relèvent pas de deux mondes séparés, mais d'un même continuum d'instabilité et d'adaptation. Les conflits en Ukraine ou dans le détroit d'Ormuz rappellent que les infrastructures de transport, aussi sophistiquées soient-elles, restent profondément dépendantes d'équilibres mondiaux fragiles. Dans le même temps, l'exemple des bus à hydrogène montre que la transition énergétique ne se limite pas à remplacer une énergie par une autre : elle déplace les vulnérabilités vers de nouveaux niveaux, souvent invisibles, plus complexes et plus dynamiques.

Ainsi, la performance des futurs systèmes de transport ne dépendra pas uniquement de la disponibilité des ressources énergétiques, mais de la capacité à gérer l'incertitude elle-même : fluctuations des flux logistiques, variabilité des usages, vieillissement accéléré des technologies et pression des événements extrêmes. Dans ce contexte, l'intelligence des réseaux – qu'elle soit humaine, technique ou algorithmique – devient aussi stratégique que l'énergie qu'elle contrôle.

Finalement, les transports du XXI^e siècle ne seront ni totalement autonomes, ni totalement résilients par nature : ils seront surtout adaptatifs. Et c'est peut-être là que se joue le véritable basculement : non pas dans la suppression des crises, mais dans la sophistication croissante de notre manière de les absorber, de les anticiper et, progressivement, de les transformer en contraintes maîtrisables plutôt qu'en ruptures subies.

Références bibliographiques

BOURAMDANE A.-A., (2026a), *Détroit d'Ormuz et réserves iraniennes, la guerre qui ébranle l'équilibre énergétique mondial (1ère partie)*, Énergie/Mines & Carrières. Disponible sur : <https://energiemines.ma/detroit-d-ormuz-et-reserves-iraniennes-la-guerre-qui-ebbranle-l-equilibre-energetique-mondial-1ere-partie>

BOURAMDANE A.-A., (2026b), *Détroit d'Ormuz et réserves iraniennes, la guerre qui ébranle l'équilibre énergétique mondial (2ème partie)*, Énergie/Mines & Carrières. Disponible sur : <https://energiemines.ma/detroit-d-ormuz-et-reserves-iraniennes-la-guerre-qui-ebbranle-l-equilibre-energetique-mondial-2eme-partie>

BOURAMDANE A.-A., (2026c), *Evaluating Effective Road Transport Decarbonization Strategies to Remain Below the 1.5°C Limit*, in *Advances in Renewable Energy Technologies: Sustainable Development of Renewable Energy*, Academic Press, pp. 587–652. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33600-3.00010-8>

BOURAMDANE A.-A., (2026d), *Natural Gas Transit from West Africa to Europe (Africa Atlantic Gas Pipeline) to Maximize Energy Security and Transit Revenues by 2050*, *Journal of Geo-Energy and Environment*. Disponible sur : <https://www.icck.org/article/abs/jgee.2025.372522>

BOURAMDANE A.-A., (2026e), *4 % du marché mondial de l'hydrogène vert en 2030 : ambition atteignable ou surestimée pour le Maroc ?*, *Énergie Mines & Carrières Magazine*. Disponible sur : <https://energiemines.ma/4-pourcent-du-marche-mondial-de-l-hydrogene-vert-en-2030-ambition-atteignable-ou-surestimee-pour-le-maroc>

BOURAMDANE A.-A., (2026f), *Profil membre sur Energy Central*, Energy Central. Disponible sur : <https://www.energycentral.com/member/124ihKBsuq>

BOURAMDANE A.-A., (2025a), [Addendum] *Le Maroc sur la voie de l'électromobilité : enjeux, avancées et perspectives*, *L'Alternative Électrique.ca*, édition février 2025. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/389436154_addendum_Le_Maroc_sur_la_Voie_de_l'Electromobilite_Enjeux_Avancees_et_Perspectives

BOURAMDANE A.-A., (2025b), Hydrogène, e-fuels et biocarburants : alternatives énergétiques pour la mobilité lourde face aux défis techniques et environnementaux, L'Alternative Électrique.ca, édition mai 2025. Disponible sur : <https://www.calameo.com/read/00656891490b2ff3a5d8d>

BOURAMDANE A.-A., (2025c), Hydrogène vert : pilier de l'indépendance énergétique européenne, mirage du Sud ou tremplin pour une coopération euro-méditerranéenne affranchie de l'asymétrie ?, Entretien recueilli par I. Ruck, CAREP Paris. Disponible sur : <https://carep-paris.org/recherche/hydrogene-vert-pilier-de-lindependance-energetique-europeenne-mirage-du-sud-ou-tremplin-pour-une-cooperation-euro-mediterraneenne-affranchie-de-lasymetrie/>

BOURAMDANE A.-A., (2025d), Optimal Pathway for Decarbonizing Canada's Maritime Transport: Short-Term (2025–2035), Medium-Term (2035–2050), and Long-Term (2050 and Beyond), Canadian Public Policy. <https://doi.org/10.3138/cpp.2025-019>

BOURAMDANE A.-A., (2025e), Optimal Pathway for Decarbonizing Canada's Maritime Transport: Short-Term (2025–2035), Medium-Term (2035–2050), and Long-Term (2050 and Beyond), Global Risk Institute. Disponible sur : <https://globalriskinstitute.org/publication/optimal-pathway-for-decarbonizing-canadas-maritime-transport-short-term-2025-2035-medium-term-2035-2050-and-long-term-2050-and-beyond/>

BOURAMDANE A.-A., (2024a), Après la COP28 : Accélérer l'infrastructure et le financement dans le secteur des véhicules électriques en vue de la COP29, L'Alternative Électrique.ca, 29e édition, novembre 2024. Disponible sur : <https://www.calameo.com/read/0065689148ceac20d5dc0>

BOURAMDANE A.-A., (2024b), Quelle technologie de véhicules électriques devrait être la plus utilisée pour la Coupe du Monde 2030 au Maroc ?, L'Alternative Électrique.ca, 27e édition, septembre 2024. Disponible sur : <https://www.calameo.com/read/006568914fb3ff6cc187f>

BOURAMDANE A.-A., (2024c), Understanding and Optimizing Hydrogen Transport Technologies for 21st Century Smart Cities: Innovation for Morocco's Green Interconnections in Hydrogen, Ammonia, and Kerosene Production, in Lytras, M.D., Alkhalidi, A. & Malik, S. (dir.), *The Emerald Handbook of Smart Cities in the Gulf Region: Innovation, Development, Transformation, and Prosperity for Vision 2040*, Emerald Publishing, pp. 405–480. <https://doi.org/10.1108/978-1-83608-292-720241030>

BOURAMDANE A.-A., (2023a), Minéraux de la transition énergétique : Criticité géologique, géostratégique et environnementale, Énergie/Mines & Carrières. Disponible sur : <https://energiemines.ma/mineraux-de-la-transition-energetique-criticite-geologique-geostrategique-et-environnementale>

BOURAMDANE A.-A., (2023b), Crafting an Optimal Portfolio for Sustainable Hydrogen Production Choices in Morocco, Fuel. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130292>

HILL J. C., (2026), The Strait of Hormuz Problem: What "Securing" the Waterway Actually Requires, RUSI. Disponible sur : <https://www.rusi.org/explore-our>

research/publications/commentary/strait-hormuz-problem-what-securing-waterway-actually-requires

IEA (2026), (s.d.), Strait of Hormuz, International Energy Agency. Consulté le 15 mai 2026. Disponible sur : <https://www.iea.org/about/oil-security-and-emergency-response/strait-of-hormuz>

IEA, (2022), Oil Market and Russian Supply - Russian Supplies to Global Energy Markets, International Energy Agency. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/russian-supplies-to-global-energy-markets>

OECD, (2023), Assessing the Impact of Russia's War against Ukraine on Eastern Partner Countries, OECD Publishing. Disponible sur : https://www.oecd.org/en/publications/assessing-the-impact-of-russia-s-war-against-ukraine-on-eastern-partner-countries_946a936c.html

UNCTAD, (2026), Strait of Hormuz Disruptions: Implications for Global Trade and Development, UNCTAD. Disponible sur : <https://unctad.org/publication/strait-hormuz-disruptions-implications-global-trade-and-development>

US EIA (2024), U.S. Crude Oil Production Reaches Record High, Today in Energy, U.S. Energy Information Administration. Disponible sur : <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65504>