

#GIDSstatement 12 / 2021

Thomas Rappuhn et Simon Struck

Les forces armées du futur

L'autonomie énergétique grâce à l'hydrogène et contribution à la création d'un nouveau marché de l'énergie ?

#GIDSstatement | N° 12 / 2021 | Décembre 2021 | ISSN 2699-4372

La Bibliothèque nationale allemande enregistre cette publication dans la bibliographie nationale allemande ; des données bibliographiques plus détaillées sont disponibles sur : <http://dnb.dnb.de>.

ISSN 2699-4372

Cet article est protégé par la licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 International (attribution – pas d'utilisation commerciale – pas de modification). Pour en savoir plus sur cette licence, veuillez consulter le lien suivant : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>.



#GIDSstatement est publié par le German Institute for Defence and Strategic Studies (GIDS).

Les articles sont consultables gratuitement sur le site Internet du GIDS : www.gids-hamburg.de

Les avis des auteurs/autrices exprimés dans #GIDSresearch ne correspondent pas nécessairement aux positions du GIDS.

Traduit par : Office fédéral des langues – service linguistique, bureau SMD 15.

Proposition de citation :

Thomas Rappuhn / Simon Struck. Les forces armées du futur. L'autonomie énergétique grâce à l'hydrogène et contribution à la création d'un nouveau marché de l'énergie ? , #GIDSstatement 12/2021, Hamburg.

GIDS

German Institute for Defence and Strategic Studies
Führungsakademie der Bundeswehr
Manteuffelstraße 20 · 22587 Hamburg, Allemagne
Tel.: +49 (0)40 8667 6801
buero@gids-hamburg.de · www.gids-hamburg.de

Les forces armées du futur

L'autonomie énergétique grâce à l'hydrogène et contribution à la création d'un nouveau marché de l'énergie ?

Préambule¹

Les objectifs nationaux et européens d'une économie décarbonée d'ici 2045 respectivement 2050 entraînent des changements profonds en termes d'approvisionnement énergétique. La substitution des énergies fossiles est l'objet de recherches menées à l'échelle mondiale.

Le sujet de l'autonomie énergétique des forces armées allemandes du futur revêt une grande importance vu les changements attendus dans les infrastructures énergétiques et les systèmes de propulsion pour la mobilité. En tant qu'utilisateur, le militaire dépend également de ces évolutions et est obligé d'observer continuellement les conséquences qui en découlent pour les stratégies et l'approvisionnement. Dans le contexte allemand, un accent important est mis sur la stratégie nationale sur l'hydrogène.

Cette étude aborde la question de savoir dans quelle mesure les sources d'énergie alternatives, notamment l'hydrogène (H₂), peuvent répondre aux besoins de la Bundeswehr. Elle se penchera donc sur tout le domaine de la mobilité militaire, y compris l'infrastructure énergétique, et cherchera à démontrer des champs d'application. En outre, elle tâchera de répondre à la question de savoir quelle contribution les forces armées peuvent apporter à l'utilisation et à la montée en puissance des énergies renouvelables, en particulier en ce qui concerne l'hydrogène. L'objectif est d'élaborer une perspective stratégique pour atteindre l'autonomie énergétique de la Bundeswehr après 2050, en s'appuyant sur une analyse des évolutions courantes et attendues de l'industrie et de la recherche et en tenant compte des objectifs climatiques européens.

Vu les durées d'utilisation longues des systèmes militaires et le temps requis pour les processus d'approvisionnement, il convient de regarder de près la transformation du marché de l'énergie civil suffisamment tôt. Dans ce but, la publication d'une série d'articles supplémentaires du GIDS est prévue en plus de cette première contribution. Une analyse des développements technologiques s'ajoutera à la détermination d'éventuels champs d'application pour la Bundeswehr en termes de conditions opérationnelles, de logistique militaire, d'interopérabilité et de sécurité de maniement.

Du point de vue militaro-opérationnel, des réponses doivent impérativement être trouvées aux questions énergétiques adressées pour concevoir les forces armées du futur.

¹ Les auteurs remercient les experts/expertes de leurs notes et remarques.

La situation initiale – un marché de l'énergie en transformation

À ce jour, le pétrole et le gaz naturel sont réputés les ressources centrales des circuits économiques mondiaux. Le militaire est également intégré dans ces circuits. La mécanisation progressive des forces armées rend des systèmes énergivores indispensables qui sont, pour l'heure, principalement propulsés à l'aide des sources d'énergie fossile susmentionnées. La capacité de planifier et de mener à bien des opérations militaires est donc de plus en plus étroitement liée à la gestion de l'énergie par les forces armées elles-mêmes². Par conséquent, une telle dépendance économique et militaire du pétrole a pour effet que l'accès à cette source énergétique ainsi que la stabilisation des marchés pétroliers deviennent une nécessité stratégique et sécuritaire comme chacun sait³.

Il s'agit d'un aspect particulièrement pertinent dans le contexte des évolutions actuelles sur le marché de l'énergie fossile. Ainsi la dégringolade des prix du pétrole suivant l'année 2014 a mené à une baisse des investissements dans ce segment de marché. Alors que les capitaux engagés avaient successivement connu une stabilisation et légèrement augmenté jusqu'en 2019, le niveau de 2014 n'a plus jamais été atteint depuis lors⁴. Cela ne remet pas en question l'importance de ces sources d'énergie qui resteront incontournables pour une période prolongée. Notamment la consommation de gaz naturel est à considérer comme une technologie de transition sur le long terme.

C'est surtout en Europe que l'extraction du pétrole brut et du gaz naturel est vue à la baisse. Cela s'explique en partie par l'épuisement progressif des gisements existants, exacerbant la dépendance au pétrole provenant de zones de crise. Les importations de gaz naturel en provenance d'Europe occidentale diminueront aussi à l'avenir. Cette évolution est attendue depuis de nombreuses années, mais elle s'accélère davantage encore car on part du principe que la consommation augmentera tandis que les investissements sont en baisse, en particulier dans l'exploration. L'exploration et de développement chronophages des gisements, nécessitant entre dix et vingt ans, seront éventuellement à l'origine de pénuries, mais surtout d'une volatilité ou bien d'une hausse des prix à l'avenir⁵.

De l'autre côté, l'accord mondial de Paris sur le climat bouleverse le contexte politico-énergétique existant et conduira probablement à un changement de la logique précitée. La position de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), prononcée au mois de mai 2021, donne à réfléchir dans ce contexte. Se basant sur les objectifs fixés par l'accord de Paris à l'horizon 2050, celle-ci remet même en cause la nécessité d'explorer de futurs gisements pétrolifères ou de gaz⁶. La réalisation de ces objectifs entraînerait une réduction de la consommation de pétrole brut et de gaz naturel, impliquant ainsi l'exploitation de sources d'énergie alternatives.

Ces évolutions montrent les enjeux du marché de l'énergie dans un proche avenir. Le manque d'investissements dans les ressources fossiles et les retards pris lors de la

² Saritas/Burmaoglu 2016 : 331–333.

³ Bayer/Struck 2021 : 4 ; Saritas/Burmaoglu 2016 : 334.

⁴ AIE 2018 : 156–163 ; AIE 2020b : 44 ; AIE 2021b : 277 sq.

⁵ AIE 2018 : 156–163.

⁶ AIE 2021a.

transition énergétique risquent de susciter des pénuries. C'est pourquoi il y a urgence à faire du progrès dans l'autonomie énergétique des forces armées.

L'énergie en 2050 – l'hydrogène comme élément d'un secteur énergétique durable

Le cadre d'un futur marché de l'hydrogène

L'hydrogène représente un élément-clé dans le processus de transformation du marché de l'énergie. Le document innovateur de l'AIE *The Future of Hydrogen (l'avenir de l'hydrogène)*, rédigé pour remise au sommet du G20 de 2019 à Osaka, peut être considéré comme un document fondamental dans ce contexte. Cela se reflète directement dans la déclaration finale des membres du G20, mettant l'accent sur le rôle primordial de ce vecteur d'énergie : « We also recognize opportunities offered by further development of innovative, clean and efficient technologies for energy transitions, including hydrogen⁷ ».

Par la suite, plusieurs membres du G20 ont élaboré des stratégies nationales en matière d'hydrogène. Ce faisant, les gouvernements soulignent l'importance décisive de l'hydrogène dans la transition énergétique d'une profusion de secteurs industriels, du marché du chauffage et surtout de la mobilité⁸.

Notamment pour le secteur des transports, la stratégie nationale sur l'hydrogène, formulée en 2020 par le gouvernement allemand, mentionne la signification particulière de celui-ci à des fins militaires.

Les applications de mobilité ont un potentiel important quant à l'usage de l'hydrogène. Le secteur des transports doit miser sur le progrès technologique afin d'atteindre ses objectifs climatiques et en matière d'énergies renouvelables. La mobilité basée sur l'hydrogène et le « Power-to-X » représente une alternative pour ces applications où l'utilisation directe d'électricité n'est pas judicieuse ou techniquement irréalisable. Cela inclut les applications militaires où l'interopérabilité interalliée doit être assurée⁹.

L'usage d'hydrogène visant à substituer les énergies fossiles dans le secteur de la mobilité, à rendre les secteurs industriels énergivores plus durables et à décrocher une partie du marché du chauffage pose cependant d'énormes défis au marché de l'énergie.

Une multiplication des besoins actuels en hydrogène est attendue au même titre que celle des capacités de production correspondantes. La stratégie nationale sur l'hydrogène du gouvernement allemand estime que les besoins en hydrogène de l'Allemagne

7 En français : nous reconnaissons également les possibilités offertes pour la transition énergétique par la poursuite du développement des technologies innovantes, propres et efficaces, notamment des technologies utilisant l'hydrogène. G20 2019 : 11.

8 Taibi/Miranda/Carmo 2020 : 19–25 ; ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020 : Commission européenne 2020 ; secrétaire d'État aux Affaires, à l'Énergie et à la Stratégie industrielle 2021 : Gouvernement des Pays-Bas 2020.

9 Traduit du texte source allemand : ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020 : 11.

dépasseront en 2050 de sept fois ceux d'aujourd'hui¹⁰. D'autres estimations prévoient des quantités requises nettement plus importantes¹¹.

L'extension du marché de l'hydrogène existant est attendue au sein de l'industrie, notamment pour les entreprises énergivores, telles que les aciéries et cimenteries¹². La mobilité représente un autre vecteur principal de la transition¹³. L'hydrogène et ses dérivés respectivement produits de filiation y prennent la place d'une alternative centrale aux combustibles fossiles et également à la mobilité électrique pour de nombreuses applications. Selon les estimations de l'AIE, les secteurs des transports et de la mobilité, ainsi que la production concomitante de carburants durables, sont susceptibles de représenter plus d'un tiers de la consommation mondiale d'hydrogène présumée en 2050. Pour l'année 2070, l'AIE pronostique même un besoin en hydrogène à hauteur de 520 millions de tonnes (pour comparaison : 75 millions de tonnes en 2019), dont on suppose que 60 pour cent seront attribuables à la mobilité¹⁴ :

Dans le scénario du développement durable, la situation est différente. La demande d'hydrogène multipliera par sept pour atteindre le montant de 520 mégatonnes d'ici 2070 [...].L'usage direct d'hydrogène dans le secteur des transports pour les voitures, les camions et les navires représentera 30 % de l'usage d'hydrogène en 2070. Dans le même temps, 20 % de l'hydrogène seront utilisés pour la production de kérosène synthétique à partir d'hydrogène et de CO₂ pour le secteur aéronautique. 10 % seront convertis en ammoniac qui servira de carburant pour le secteur naval. Cela couvrira presque la moitié de tous les besoins en combustibles marins en 2070¹⁵.

Une signification particulière est donc accordée à l'hydrogène pour assurer la mobilité du futur.

Le défi du développement du marché de l'hydrogène

L'intégration approfondie d'un vecteur énergétique alternatif pose néanmoins le défi de l'introduire dans un marché de l'énergie existant, où des technologies énergétiques (fossiles) se sont déjà établies. Une politique économique favorable aux technologies, souvent citée par les économistes dans le contexte de la politique climatique, risque cependant d'entraver la montée en puissance des sources d'énergie alternatives :

L'hypothèse selon laquelle une libre concurrence des différentes technologies pourrait permettre d'atteindre cet objectif à un coût minimal est seulement valable si les technologies entrent en lice dans les mêmes conditions de départ. Elle ne s'applique plus si des technologies au point et éprouvées concurrencent celles qui se trouvent encore dans un stade précoce et qui présentent un potentiel considérable de réduction des coûts (p. ex. par des économies d'échelle et des effets de courbe d'apprentissage). Ces

¹⁰ Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020 ; Commission européenne 2020.

¹¹ Robinius et al. 2020.

¹² Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020 : 2.

¹³ AIE 2020a, 2019 ; Robinius et al. 2020 ; Perner/Unteutsch/Lövenich 2018 ; Merten et al. 2020.

¹⁴ AIE 2020a : 110.

¹⁵ Traduit du texte source anglais : AIE 2020a : 110.

technologies innovantes ont souvent le potentiel d'atteindre, sur le long terme, les objectifs climatiques fixés, tout en étant moins onéreuses que les technologies établies¹⁶.

Par conséquent, dans son étude *The Future of Hydrogen*, l'AIE souligne le rôle prépondérant des acteurs étatiques dans le contexte d'une montée en puissance du marché de l'hydrogène¹⁷. Les directives respectivement stratégies définies par l'État auraient pour but d'engager une évolution qui rend l'extension de l'hydrogène dans le marché de l'énergie plus efficiente du point de vue de la gestion d'entreprise aussi. Car la montée en puissance successive d'un marché de l'hydrogène dans les secteurs de l'industrie et des transports nécessite le renforcement des structures des transports au même titre que celles de la demande. L'enjeu du secteur énergétique consiste alors à monter en puissance un marché de l'hydrogène sans qu'il y ait des mécanismes du marché clairs, vu que les projets d'infrastructure sont seulement susceptibles d'attirer les investisseurs si les besoins sont avérés¹⁸.

Il est à noter que l'ingérence de l'État dans le marché de l'énergie comportent également un risque substantiel politico-économique. Ainsi, des mécanismes étatiques de contrôle peuvent avoir pour corollaire que des moyens seront alloués et des investissements seront faits en faveur d'une technologie qui s'avère moins efficiente et concurrentielle sur le long terme. Le fait concomitant de concentrer les efforts sur la création de besoins et d'infrastructures au profit d'un seul type de technologie peut ainsi se répercuter défavorablement sur le développement du secteur de l'énergie¹⁹.

Dans le contexte de l'hydrogène, un tel risque est tout de même minime, puisque le H₂ est directement utilisable de façon variée comme vecteur d'énergie et présente un large éventail de champs d'application. Dans le domaine de la mobilité, il est donc possible d'utiliser directement l'hydrogène comme carburant pour les moteurs à hydrogène adaptés²⁰. L'hydrogène est d'ores et déjà utilisé en combinaison avec la technologie de la pile à combustible dans différentes applications.

L'*hydrogène vert* produit à partir d'énergies renouvelables est en outre l'un des éléments indispensables à la production de carburants synthétiques (e-carburants), nécessitant des procédures complexes et chères. Susceptibles d'être exploités à l'aide de l'infrastructure de transport en place, ces carburants seront probablement nécessaires pour des applications gourmandes en énergie. Néanmoins, pour la production de ceux-ci ainsi que de l'*hydrogène vert*, des économies d'échelle considérables seraient requises²¹.

La production de ce que l'on appelle l'*hydrogène gris* à partir de sources d'énergie fossile, comme le gaz naturel, pourrait prendre de l'ampleur. Cependant, le stockage de CO₂ par la capture et la séquestration du dioxyde de carbone, requis pour décarboner ce processus (*hydrogène bleu*), ne peut guère être perçu comme une solution durable dû aux quantités faibles. Les capacités de cette approche semblent assez limitées devant les volumes importants de CO₂ attendus. C'est pourquoi ce processus de production est à considérer comme une technologie de transition à long terme. On peut douter que les

¹⁶ Traduit du texte source allemand : Kemfert/Elmer/Dross 2017 : 485.

¹⁷ AIE 2019.

¹⁸ Schulte/Schlund 2020; Kemfert/Elmer/Dross 2017 : 484–486.

¹⁹ Kemfert/Elmer/Dross 2017.

²⁰ Klell/Eichlseder/Trattner 2018.

²¹ Perner/Unteutsch/Lövenich 2018.

objectifs climatiques puissent être atteints d'ici 2050 et au-delà par l'utilisation généralisée et durable d'une telle technologie.

De ce fait, *l'hydrogène vert* occupe une place centrale dans la future production et consommation d'énergie, selon les connaissances actuelles. Le gouvernement fédéral, l'UE et des institutions scientifiques s'attendent à une augmentation massive des besoins en hydrogène dans les décennies à venir²². À présent, les capacités de production restent limitées. Une expansion dans le but de réaliser les dimensions visées semble très ambitieuse et demande des investissements massifs dans les installations requises et notamment dans l'infrastructure et les transports pour assurer les importations dès lors nécessaires.

Il semble clair que la compétitivité économique de la chaîne de valeur par rapport à d'autres systèmes de production d'énergie est, bien évidemment, la condition de base pour que l'utilisation de *l'hydrogène vert* puisse jouer un rôle clé. Car l'objectif n'est pas l'utilisation d'une certaine technologie, mais l'idée de systématiquement éviter des émissions. Seule l'observation des coûts sur l'ensemble du cycle peut donner des indices relatifs à l'attractivité d'une technologie pour les investisseurs.

La conception du marché de l'hydrogène et le rôle de l'État

Les enjeux identifiés confèrent un rôle particulier aux acteurs étatiques dans le processus de montée en puissance des sources d'énergie alternatives. L'approche globale de l'AIE est en plus une option prometteuse. Elle part du principe que la montée en puissance du marché de l'hydrogène se déroulera dans un premier temps dans des *Coastal Industrial Clusters (pôles industriels en régions côtières)* à un niveau régional limité afin d'adapter et d'augmenter les besoins et consommations respectifs sur un plan régional. Dans ce contexte, l'AIE a identifié la mer du Nord comme une région éminemment propice à la mise en œuvre d'un tel concept²³.

L'expansion du marché de l'hydrogène dans le contexte d'une telle conception de marché va de pair avec la question de savoir comment l'hydrogène peut être mis à disposition aux pôles industriels. L'étude de l'AIE et la stratégie nationale sur l'hydrogène du gouvernement allemand, l'accent soulignent la signification des importations d'hydrogène dans le cadre d'une montée en puissance continue de ce vecteur énergétique. Ceci est notamment dû au fait que les énergies renouvelables nécessaires et les installations d'électrolyse peuvent être mises en place dans les régions ensoleillées et venteuses²⁴. Une coopération approfondie avec des pays tels que ceux de l'Afrique du Nord et du Proche-Orient pourra également encourager la fondation d'une nouvelle *OPEP de l'hydrogène*.

Ce genre de réflexion présente également des implications centrales aux niveaux économique et stratégique : de ce fait, les besoins d'importation de sources énergétiques persisteront et risquent même de s'exacerber. À la différence du pétrole brut, le H₂ importé serait un vecteur d'énergie polyvalent et directement utilisable. Par conséquent,

²² Cette tendance s'accroît par la production d'énergie visée au moyen de centrales à gaz alimentées par l'hydrogène vert, voir ministère fédéral de l'Économie et de la Protection du climat 2022.

²³ AIE 2019 : 177–182.

²⁴ Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020 : 4 : AIE 2019 : 191 sq.

les chaînes de valeur qui comprennent l'ingénierie des processus en Europe, prévalant dans le processus de raffinage dans l'industrie du pétrole brut, n'auraient plus lieu d'être en grande partie.

En plus de la production, l'infrastructure des transports est essentielle pour la conception du marché. Du point de vue des auteurs, les transports routier et ferroviaire, mais aussi fluvial seraient cruciaux²⁵, puisqu'ils permettent de répondre aux besoins croissants grâce à la flexibilité nécessaire, sans avoir besoin d'investissements importants durant la montée en puissance qui ne seront pas justifiés en termes de gestion d'entreprise. L'aménagement intensifié de systèmes de pipelines servant à acheminer l'hydrogène ou bien l'usage de gazoducs et de réservoirs de gaz naturel existants pour l'hydrogène²⁶ ne peut intervenir avant que les pôles industriels de l'hydrogène visés manifestent des besoins fiables.

En ce qui concerne la mise en place de structures de la demande d'hydrogène, l'AIE souligne surtout la nécessité de pénaliser, de façon neutre sur le plan technologique, des sources d'énergie fossile, p. ex. au moyen de la tarification du CO₂, tout en mettant l'accent sur des instruments spécifiques politico-économiques : la mise à disposition de subventions et d'incitations, comme mentionnée dans la stratégie nationale sur l'hydrogène du gouvernement fédéral²⁷, et l'évolution ciblée de la demande au travers d'acteurs étatiques et de projets publics représentent un instrument clé à cette fin²⁸. Les forces armées pourraient y jouer un rôle central aussi.

Le potentiel de la Bundeswehr en vue du développement d'un marché de l'hydrogène

La recherche (fondamentale) militaire dans les domaines de l'énergie nucléaire et de la technologie des turbines de gaz, qui a laissé une empreinte considérable sur le secteur civil, montre que les forces armées ont pu apporter des contributions importantes également dans le secteur énergétique. Pour ce qui est des énergies renouvelables, ce sont surtout les innovations civiles qui sont reprises par les forces armées²⁹.

Néanmoins, les forces armées peuvent faire avancer les technologies (énergétiques) et les segments de marché correspondants par des effets de second ordre, indépendamment des innovations directes effectuées dans le secteur de la défense³⁰. En sa qualité d'usager de technologies (civiles), l'approvisionnement militaire donne des élans importants, notamment dans un stade précoce du développement technologique. *Lead- et First Purchaser (premier client et client principal)* de technologies, les forces armées américaines implémentent des produits dans des phases précoces de leur développement, dont elles attendent une amélioration de leurs capacités militaires. Stimulant la demande au tout début de la conception du produit, ces impulsions deviennent alors un instrument qui sert à gérer les mesures incitatives car les entreprises impliquées sont incitées à faire des investissements stratégiques dans le développement continu de la

²⁵ AIE 2019 : 191.

²⁶ Wang et al. 2020 : 6.

²⁷ Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie 2020.

²⁸ AIE 2019 : 175-177,181 sq.

²⁹ Bayer/Struck 2021 : 8.

³⁰ Sempere 2018 : 229 ; Soni 2020 : 128 ; Bayer/Struck 2021.

technologie respective. Quand la technologie respectivement la source d'énergie s'établit par la suite sur le marché, elle peut se révéler bénéfique d'un point de vue économique pour les entreprises civiles³¹.

En raison d'un vaste réseau de biens-fonds et d'un grand parc automobile civil et militaire qui compte plus de 30 000 véhicules (y compris le « Bw FuhrparkService » – *service du parc de véhicules de la Bundeswehr*), la Bundeswehr est la plus grande consommatrice de carburant parmi les autorités fédérales (pour comparaison : la police fédérale ne possède que 7 000 véhicules environ). Il en découle que les forces armées seront susceptibles d'être gourmandes en hydrogène. Alors que la consommation de carburant des forces armées allemandes ne totalisa qu'environ trois térawatt-heures en 2018³², les consommations potentielles seront nettement plus élevées en fonction du scénario opérationnel. Si l'on rajoute les 1 450 biens-fonds et les plus de 33 000 bâtiments³³ de l'armée allemande, celle-ci pourrait devenir un instrument national important pour l'évolution de la demande dans le cadre de la conception du marché mentionné ci-dessus, en intégrant l'hydrogène dans sa propre gestion énergétique.

Les champs d'application de futures sources d'énergie militaires doivent alors faire l'objet d'une analyse en vue de la transformation nationale du secteur de l'énergie. Cela permettrait de tirer parti des synergies entre le développement du marché civil et les applications militaires.

L'hydrogène comme carburant de la mobilité militaire

Le contexte dans lequel se situent les forces armées, en particulier au regard de la mobilité militaire, posent des défis quant à l'intégration de sources énergétiques alternatives. La *Single Fuel Policy* (*politique du carburant unique*) des forces armées états-uniennes et de leurs alliés de l'OTAN ne sous-entend pas que les possibilités de diversification de l'énergie soient restreintes³⁴.

Le fait de restreindre les usagers militaires à un seul carburant et, de ce fait, réduire les incitations à faire des expériences avec des alternatives a contribué à renforcer l'attitude générale que les carburants issus du pétrole sont les seules sources d'énergie utilisables en intervention. Le Département de la Défense [et ses alliés] devra remettre en cause le concept du carburant unique et adopter dans son intégralité les recommandations mentionnées dans son rapport « Operational Energy Strategy » [stratégie énergétique en opération] de 2016 afin de minimiser les risques en lien avec le futur environnement opérationnel grâce à « l'innovation » et à « la diversification » des sources d'énergie opérationnelles³⁵.

En conséquence, le Département de la Défense états-unien appelle également à l'innovation et à la diversification des sources énergétiques. C'est pour cette raison que des

³¹ Mowery 2010 : 1236 sq. ; Schmid 2018 : 597 ; Bayer/Struck 2021.

³² Bundestag allemand 2019 : 7.

³³ Ministère fédéral de la Défense 2021.

³⁴ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021 [Académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine 2021].

³⁵ Traduit du texte source anglais : Kern et al. 2021 ; voir aussi US Department of Defense [Département états-unien de la Défense] 2016 : 13 sq.

applications, comme p. ex. les drones, les groupes auxiliaires de puissance [GAP], les voitures et les véhicules blindés, propulsés à partir de piles à combustible ou de moteurs à combustion d'hydrogène, sont en phase d'essai au sein des forces armées américaines³⁶.

Il importe que non seulement quelques-uns des États de l'OTAN fassent avancer de telles stratégies de diversification. L'interopérabilité des forces armées rend nécessaire de faire progresser le développement et la mise en œuvre de systèmes d'énergie durables, comme p. ex. l'hydrogène, dans un contexte otanien. Une approche globale de ce genre aurait pareillement des effets positifs sur la disponibilité de ces sources d'énergie sur le plan mondial dans un contexte spécifiquement militaire. Il convient donc d'approfondir la coopération entre les États membres de l'OTAN sur ce point. Des initiatives semblables existent déjà entre certains alliés européens au niveau des infrastructures³⁷.

Une future utilisation directe de l'hydrogène comme vecteur d'énergie par la Bundeswehr doit alors être considérée comme un processus qui s'inscrit dans la durée. C'est pour cette raison que le choix s'est porté sur une période d'observation d'ici 2050. La durée d'utilisation prolongée de systèmes militaires et le temps requis pour le processus d'approvisionnement rendent nécessaire l'examen en temps utile des possibilités d'introduction de systèmes propulsifs et énergétiques alternatifs. Il est donc impératif que le processus d'approvisionnement s'oriente et s'adapte dès le début à un marché de l'énergie et du carburant en voie de changement.

Compte tenu des nouveaux développements dans le secteur de la mobilité, l'hydrogène pourrait devenir une option de plus en plus intéressante pour les acteurs militaires, puisque les systèmes propulsifs manifestent d'ores et déjà des pistes de développement susceptibles de bénéficier grandement aux applications militaires :

Le potentiel militaire que renferme l'hydrogène comme vecteur énergétique n'est pas une nouveauté. Les forces armées états-uniennes l'ont reconnu assez tôt en 2011, entre autres en rapport avec des applications de la pile à combustible³⁸. La Bundeswehr aussi se sert déjà de l'hydrogène, p. ex. pour les sous-marins³⁹. Notamment les piles à combustible offrent des avantages directs au niveau opérationnel parce qu'elles présentent des signatures acoustique, visuelle et thermique réduites par rapport aux systèmes propulsifs conventionnels⁴⁰.

Certes, il convient de non seulement démontrer les avantages opérationnels pour les systèmes d'armes au sens strict dans le contexte d'une utilisation généralisée de l'hydrogène dans les forces armées. Il s'agit plutôt de prendre en considération les implications pour les systèmes énergétiques militaires et leur logistique dans le pays et en opération extérieure - p. ex. au niveau de la production, du stockage et du transport de ce vecteur énergétique.

Notamment les développements civils montrent déjà le grand potentiel de l'hydrogène dans un contexte militaire. Il existe déjà des moteurs bi-carburant sur le marché

³⁶ Gross/Poche/Ennis 2011 ; Stroman et al. 2018 ; Zhou et al. 2021 ; MayorHilsem/Zimmermann 2019.

³⁷ Agence européenne de défense 2020.

³⁸ Gross/Poche/Ennis 2011.

³⁹ Krummrich/Hammerschmidt 2016.

⁴⁰ Das 2017.

pour usage au sein de la marine civile, afin de faire fonctionner flexiblement des remorqueurs et ferrys à l'aide d'hydrogène et de gazole conventionnel⁴¹. De tels concepts pourraient se révéler clé dans une phase préliminaire de l'intégration militaire de nouveaux vecteurs énergétiques, car l'hydrogène peut être utilisé dans ce cas, sans que l'interopérabilité dans le contexte de la politique du carburant unique de l'OTAN soit impactée.

Différents fabricants allemands misent sur les systèmes propulsifs à base d'hydrogène pour la mise au point de moteurs, notamment pour les poids lourds et les machines spéciales dans l'agriculture et la construction. La technologie de batterie de la mobilité électrique y atteint ses limites pour l'instant. La performance des moteurs à combustion d'hydrogène s'apparente à celle des groupes à propulsion conventionnelle (essence et gazole). L'écart de performance s'élève actuellement à 20 pour cent et peut être optimisé⁴². Dans ces secteurs, en plus du moteur à combustion d'hydrogène qui devra faire l'objet de développements continus, la pile à combustible représente une autre option importante pour la propulsion à hydrogène.

Dans l'aviation civile, un grand constructeur aéronautique a récemment mis l'accent sur l'hydrogène comme vecteur énergétique pour une aviation à zéro émission nette dans le cadre des vols court- et moyen-courriers⁴³. Les constructeurs sont également convaincus que les systèmes propulsifs à hydrogène peuvent être mis en œuvre à succès dans les réacteurs⁴⁴. Il est évident que la disponibilité opérationnelle de tous ces développements prometteurs doit d'abord être vérifiée plus en détail. Il en est de même pour les profils de capacité et de performance de la Bundeswehr.

L'enjeu du H₂ dans le contexte de la mobilité militaire

Cependant, un regard différencié sur le H₂ s'impose. Ainsi, ce sont surtout les défis centraux de l'hydrogène dans les applications militaires qui deviennent critiques car la teneur énergétique faible en volume et la manipulation du gaz volatile nécessitent des progrès dans les technologies de stockage⁴⁵.

Il paraît néanmoins audacieux de vouloir anticiper aujourd'hui le résultat d'un programme de recherche à hauteur de quelque neuf milliards d'euros qui proviennent exclusivement de la stratégie nationale sur l'hydrogène. La vague d'innovation déclenchée par les stratégies nationale et européenne en matière d'hydrogène n'est pas à sous-estimer. Les points cruciaux, comme les systèmes de réservoir innovants pour le stockage d'hydrogène ainsi que le transport du gaz dans les porteurs, sont en passe d'être optimisés grâce à des approches de développement très prometteuses⁴⁶. Le transport d'hydrogène liquéfié généralement connu (LH₂), les porteurs liquides organiques d'hydrogène (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC), mais aussi l'ammoniac ou le méthanol y sont à mentionner entre autres.

⁴¹ BeH2ydro 2021 ; CMB.Tech 2021.

⁴² Schrank/Langer/Jacobson 2021.

⁴³ Airbus 2021.

⁴⁴ Dilba 2021.

⁴⁵ Les aspects politico-écologiques doivent pareillement être pris en compte vu que des oxydes d'azote sont émis lors de la combustion d'hydrogène par exemple.

⁴⁶ Klell/Eichlseder/Trattner 2018 : 137–139.

Il semble donc prématuré de définir les limites de l'usage d'hydrogène à l'heure actuelle. C'est pourquoi une stratégie du ministère fédéral de la Défense⁴⁷ basée purement sur des carburants synthétiques en vue de systèmes énergétiques durables pourrait seulement être interprétée comme une stratégie à moyen terme pour la mobilité militaire, puisque ces carburants seraient relativement faciles à intégrer, compte tenu du nombre réduit d'adaptations infrastructurelles qui seraient à effectuer. Il faut être conscient qu'en l'état actuel des choses, surtout les applications énergivores, comme les avions de combat, les chars d'assaut lourds et certains bâtiments de la marine, nécessiteront probablement des carburants synthétiques afin de substituer les carburants fossiles, vu la teneur énergétique plus élevée.

Néanmoins, des investissements supplémentaires et considérables dans les centrales génératrices seront de mise en la matière pour développer les capacités requises. L'infrastructure de production nécessiterait également une production d'hydrogène à base d'énergies renouvelables, puisque *l'hydrogène vert* est un composant des chaînes de production de carburants synthétiques durables (e-carburants).

L'hydrogène vert comme carburant direct pour les moteurs à combustion et les piles à combustible est une option moins coûteuse et plus facile à réaliser du point de vue de l'ingénierie⁴⁸. Les acteurs de l'économie civile dans les domaines des transports, du trafic par camion, de la navigation côtière ainsi que des vols court- et moyen-courriers, pourraient donc considérer l'hydrogène comme la solution la plus économique sur le long terme, notamment au regard des innovations en matière des technologies de stockage et de propulsion. Les forces armées allemandes suivront cette voie quand la question des carburants du futur se posera.

L'usage de l'hydrogène pour le fonctionnement des biens-fonds – les sites de la Bundeswehr, peuvent-ils contribuer à la montée en puissance de l'hydrogène ?

Outre ce genre d'implications pour le secteur de la mobilité militaire, l'utilisation de l'hydrogène comporte également des avantages opérationnels directs dans le fonctionnement des biens-fonds, si ce vecteur d'énergie est intégré dans un concept global de la gestion énergétique militaire. Des procédés courts d'électrolyse en combinaison avec les énergies renouvelables permettent de réaliser des centrales génératrices décentralisées à l'intérieur des biens-fonds. Cela pourrait couvrir les besoins propres nécessaires au fonctionnement des biens-fonds et au parc de véhicules et établirait ainsi des sites autonomes en énergie. Ces réflexions se manifestent déjà dans le projet RESHUB de l'Agence européenne de défense et le Munich Mobility Research Campus (*campus de recherche en matière de mobilité à Munich*) de l'université de la Bundeswehr à Munich⁴⁹.

De tels concepts d'autonomie énergétique peuvent avoir des répercussions sur la montée en puissance de l'hydrogène. Cela est démontré en partie dans le projet de l'Agence européenne de défense. Ces plans et projets prévoient que les sites apportent

⁴⁷ Ministère fédéral de la Défense/ministère fédéral de l'Intérieur 2021.

⁴⁸ Perner/Unteutsch/Lövenich 2018.

⁴⁹ Agence européenne de défense 2020; Centre de recherche numérique et technologique de la Bundeswehr 2020.

leur concours à l'infrastructure de l'hydrogène au niveau national⁵⁰. Conjointement avec une montée en puissance dans les *Coastal Industrial Clusters* (*pôles industriels en régions côtières*), ce sont notamment les sites, y compris leurs parcs de véhicules et biens-fonds, qui pourraient devenir, dans les pays limitrophes de la mer du Nord, un important consommateur et carrefour d'une première montée en puissance, tout en encourageant la mise en place d'infrastructures de transport et de stations-services au profit du secteur de la mobilité.

Les forces armées pourraient donc représenter une option politico-économique importante dans la première phase de la montée en puissance. Comme *primo adoptant*, elles pourraient développer leur propre autonomie énergétique et donner des impulsions importantes dans la création de la demande et de l'infrastructure sur le marché de l'hydrogène. Des concepts facilitant une utilisation civile et militaire dans le sens de l'approche « Dual Use » (double utilisation), p. ex. en temps de paix, peuvent s'avérer utiles en la matière. L'intégration des stations-service d'hydrogène situées dans les emprises militaires dans un réseau de stations-service civils est concevable dans ce contexte.

Conclusion :

une nouvelle image identitaire des forces armées

Le fait de réunir ces objectifs politico-énergétiques et militaires présuppose pourtant une nouvelle image identitaire de la Bundeswehr. Car les forces armées devront comprendre leur rôle comme celui d'un acteur dans le système énergétique et économique. Pour ce faire, le militaire aussi devra abandonner son rôle plutôt passif de consommateur de technologies et d'énergies et viser une approche active envers les systèmes énergétiques au niveau national. Le grand parc de véhicules qui en compte plus de 30 000 véhicules (y compris le Bw-FuhrparkService – service du parc de véhicules de la Bundeswehr) et le fonctionnement des biens-fonds font des forces armées un consommateur important en énergie, capable d'apporter, notamment dans la phase préliminaire du développement des infrastructures énergétiques durables, une contribution à la montée en puissance, conjointement avec les autres organisations nationales et régionales. La Bundeswehr pourrait ainsi représenter un outil politico-économique pour la montée en puissance d'un marché de l'hydrogène. L'intégration d'acteurs militaires dans des projets d'infrastructure permet également d'allouer des fonds publics supplémentaires au budget de la défense, ce qui contribuerait théoriquement à atteindre l'objectif de deux pour cent du PIB défini par l'OTAN.

Une telle intégration infrastructurelle des forces armées sous-entend cependant dans un premier temps une évaluation différenciée des futurs vecteurs énergétiques à utiliser au sein de la Bundeswehr. L'hydrogène et ses dérivés respectivement produits de filiation constitueront à l'avenir un élément central pour rendre les forces armées climatiquement neutres. Sur ce point, il convient cependant de regarder de plus près les possibilités d'une utilisation directe de l'hydrogène parce que son intégration se dessine d'ores et déjà dans l'utilisation civile.

⁵⁰ Agence européenne de défense 2020.

Les développements actuels sont prometteurs pour rendre l'hydrogène exploitable comme carburant militaire. Cela présente, comme expliqué ci-dessus, aussi des avantages militaires. Des solutions « bi-carburant » pour la navigation côtière disposent déjà, pour certaines applications, d'un niveau de performance similaire à celui des systèmes de propulsion courants. Par conséquent, leur intégration est également envisageable dans un contexte militaire. Dans l'aéronautique aussi, les fabricants de réacteurs et de systèmes sont sûrs que l'hydrogène pourra être exploité comme carburant climatiquement neutre pour les vols court- et moyen-courriers. Les principaux fabricants de moteurs et de systèmes dans le secteur des machines spéciales pour le bâtiment et l'agriculture ainsi que pour le transport en autobus et par camion ont récemment présenté des concepts de propulsion innovants qui suggèrent, de surcroît, une intégration dans des systèmes militaires, y compris dans ceux de l'armée de Terre⁵¹. Outre les transports, la focale pourrait être centrée sur les véhicules blindés légers - les deux étant des domaines qui comportent un important parc de véhicules. Ces développements doivent évidemment faire l'objet d'une évaluation approfondie afin de conclure s'ils sont en mesure de répondre aux besoins de la Bundeswehr en termes de capacité et de performance. La définition de projets pilotes pourrait représenter un moyen pour y arriver.

Les développements présentés dans ce document seront complétés de façon différenciée par d'autres articles du GIDS, afin d'évaluer dans quelle mesure ils se prêtent aux applications militaires. Une future autonomie énergétique des forces armées nécessite davantage d'examen détaillés portant sur la production et l'infrastructure de l'hydrogène. En plus de cette analyse, la contribution potentielle de la Bundeswehr à la conception d'un futur marché de l'hydrogène sera étudiée.

Bibliographie :

- Agence européenne de défense (2020) : First Energy Consultation Forum project to receive EU funding, <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2020/03/10/first-energy-consultation-forum-project-to-receive-eu-funding>, dernière consultation le 09/08/2021.
- AIE (2018) : World Energy Outlook 2018, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>, dernière consultation le 16/05/2021.
- AIE (2019) : The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, dernière consultation le 20/07/2021.
- AIE (2020a) : Energy Technology Perspectives 2020, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>, dernière consultation le 26/07/2021.
- AIE (2020b) : World Energy Investment 2020, <https://sun-connect-news.org/fileadmin/DATEIEN/Dateien/New/WEI2020.pdf>, dernière consultation le 24/11/2021.
- AIE (2021a) : Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0716bb9a-6138-4918-8023-cb24caa47794/NetZe-robby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>, dernière consultation le 18/05/2021.
- AIE (2021b) : World Energy Outlook 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/888004cf-1a38-4716-9e0c-3b0e3fdbf609/WorldEnergyOutlook2021.pdf>, dernière consultation le 24/11/2021.

⁵¹ AVL/ZSW 2021 ; Airbus 2021 ; BeH2ydro 2021.

- Airbus (2021) : Hydrogen. An energy carrier to fuel the climate-neutral aviation of tomorrow, https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/airbus_hydrogen_future_aviation_1P%20%281%29.pdf, dernière consultation le 10/03/2021.
- AVL/ZSW (2021) : Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-System-vergleich.pdf, dernière consultation le 22/11/2021.
- Bayer, Stefan/Struck, Simon (2021) : Trendszenario Grüne Armee. Strategische Überlegenheit durch Nachhaltigkeit?, Paru dans : Stratos, septembre 2021.
- BeH2ydro (2021) : Information Sheet, https://www.behydro.be/docs/Information_sheet_spreads_web.pdf, dernière consultation le 10/03/2021.
- Bundestag allemand (2019) : Drucksache 19/15249 vom 15.11.2019, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sevim Dağdelen, Heike Hänsel, Christine Buchholz, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE (Drucksache 19/13708) : Das Militär und der Klimawandel – Die ökologischen Kosten der Bundeswehr, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/152/1915249.pdf>, dernière consultation le 12/11/2021.
- Centre de recherche numérique et technologique de la Bundeswehr (Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr) (2020) : MORE – Aufbau und Forschungsbetrieb eines Modellcampus. Munich Mobility Research Campus [campus de recherche de Munich pour la mobilité], <https://dtecbw.de/home/forschung/unibw-m/projekt-more>, dernière consultation le 23/08/2021.
- CMB.Tech (2021) : Hydrotug, <https://cmb.tech/hydrotug-project>, dernière consultation le 14/10/2021.
- Commission européenne (2020) : A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf, dernière consultation le 16/05/2021.
- Das, J. Narayana (2017) : Fuel cell technologies for defence applications, paru dans : Raghavan, K. V./Ghosh, Purnendu (éd.), Energy Engineering. Proceedings of CAETS 2015 Convocation on Pathways to Sustainability, Springer Nature : Singapour, p. 9–18.
- Dilba, Denis (2021) : Integrating hydrogen propulsion into aircraft, paru dans : AERO Report, <https://aeroreport.de/en/innovation/integrating-hydrogen-propulsion-in-to-aircraft>, dernière consultation le 20/09/2021.
- G20 (2019) : G20 Osaka Leaders' Declaration, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2019/06/29/g20-osaka-leaders-declaration/>, dernière consultation le 07/09/2021.
- Gouvernement des Pays-Bas (Government of the Netherlands) (2020) : Government Strategy on Hydrogen, <https://www.government.nl/documents/publications/2020/04/06/government-strategy-on-hydrogen>, dernière consultation le 06/09/2021.
- Gross, Thomas J. /Poche, Albert J./Ennis, Kevin C. (2011) : Beyond Demonstration. The Role of Fuel Cells in DoD's Energy Strategy, <https://pdfs.semanticscholar.org/cafb/db54bcaf93b40dbe4726a29d501e938aabc9.pdf>, dernière consultation le 05/07/2021.
- Kemfert, Claudia/Elmer, Carl-Friedrich/Dross, Miriam (2017) : Grenzen der Technologieneutralität, paru dans : Zeitschrift für Politikwissenschaft 27 (4), p. 483–491.
- Kern, Paul J./Mills, Walker/Limpaecher, Erik/Santoli, Matt/Flanagan, Ben (29/06/2021) : An Albatross Around the US Military's Neck. The Single Fuel

- Concept and the Future of Expeditionary Energy, <https://mwi.usma.edu/an-albatross-around-the-us-militarys-neck-the-single-fuel-concept-and-the-future-of-expeditionary-energy/>, dernière consultation le 13/10/2021.
- Klell, Manfred/Eichlseder, Helmut/Trattner, Alexander (2018) : Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer Fachmedien : Wiesbaden.
- Krummrich, Stefan/Hammerschmidt, Albert (2016) : Hydrogen and Fuel Cells in Submarines, paru dans : Stolten, Detlef/Emonts, Bernd (éd.), Hydrogen Science and Engineering. Materials, Processes, Systems and Technology, Wiley-VCH : Weinheim, p. 991–1010.
- Mayor-Hilsem, Damien/Zimmermann, Reiner (2019) : A Review of Fuel Cells and Their Military Applications, paru dans : Energy Security : Operational Highlights 12, p. 21–31.
- Merten, Frank/Scholz, Alexander/Krüger, Christine/Heck, Simon/Girad, Yann/Mecke, Marc/Goerge, Marius (2020) : Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung, Wuppertal Institut; DIW Econ : Wuppertal.
- Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (2020) : Die Nationale Wasserstoffstrategie, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?_blob=publicationFile&v=16, dernière consultation le 22/06/2020.
- Ministère fédéral de l'Économie et de la Protection du Climat (2022) : EU-Taxonomie. Statement von Bundesminister Habeck am 01.01.2022, Berlin, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Meldung/2022/20220101-atomenergie-als-nachhaltig-zu-labeln-ist-falsch.html>, dernière vérification le 14/02/2022.
- Ministère fédéral de la Défense (2021) : Anzahl der Liegenschaften und Materiallage der Bundeswehr, Stand November 2019, <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/zahlen-daten-fakten/anzahl-liegenschaften-materiallage-bundeswehr>, dernière consultation le 09/11/2021.
- Ministère fédéral de la Défense/ministère fédéral de l'Intérieur (24/03/2021) : Positionspapier zur Notwendigkeit der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen, dernière consultation le 26/03/2021.
- Mowery, David C. (2010) : Military R&D and Innovation, paru dans : Hall, Bronwyn FI. (éd.), Handbook of the economics of Innovation. Volume 2, Elsevier North-Holland : Amsterdam/Heidelberg, p. 1219–1256.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021) : Powering the U.S. Army of the Future, <https://www.nap.edu/catalog/26052/powering-the-us-army-of-the-future>, dernière consultation le 15/10/2021.
- Perner, Jens/Unteutsch, Michaela/Lövenich, Andrea (2018) : Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, paru dans : Agora Verkehrswende/Agora Energiewende, https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Pro-jekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Kosten_strombasierter_Brennstoffe_WEB.pdf, dernière consultation le 16/05/2021.
- Robinius, Martin/Markewitz, Peter/Lopion, Peter/Kullmann, Felix/Heuser, Philipp-Matthias/Syranidis, Konstantinos/Cerniauskas, Simonas/Schöb, Thomas/Reuß, Markus/Ryberg, Severin/Kotzur, Leander/Calayan, Dilara/Welder, Lara/Linßen, Jochen/Grube, Thomas/Heinrichs, Heidi/Stenzel, Peter/Stolte, Detlef (2020) : Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Bd. 499), Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag: Jülich.
- Saritas, Ozcan/Burmaoglu, Serhat (2016) : Future of sustainable military Operations

- under emerging energy and security considerations, paru dans : *Technological Forecasting and Social Change* 102, p. 331–343.
- Schmid, Jon (2018) : *The Diffusion of Military Technology*, paru dans : *Defence and Peace Economics* 29 (6), p. 595–613.
- Schrank, Michael/Langer, Vivien/Jacobson, Benjamin (2021) : *Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb. Metastudie*, paru dans : Now GmbH Berlin, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/N0W_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf, dernière consultation le 21/02/2022.
- Schulte, Simon/Schlund, David (2020) : *Hintergrund Nationale Wasserstoffstrategie. Technologieneutralität ermöglicht Markthochlauf und langfristige kosteneffiziente Versorgung*, paru dans : *EWI Policy Brief*, mai 2020.
- Secretary of State for Business, Energy & Industrial Strategy (2021) : *UK Hydrogen Strategy*, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf, dernière consultation le 06/09/2021.
- Sempere, Carlos Martí (2018) : *What Is Known About Defence Research And Development Spill-Over?* Paru dans : *Defence and Peace Economics* 29 (3), p. 225–246.
- Soni, Anmol (2020): *Disruptive Energy Technologies and Military Capabilities*, paru dans : Kosal, Margaret E. (éd.), *Disruptive and Game Changing Technologies in Modern Warfare. Development, Use, and Proliferation*, Springer International Publishing : Cham, p. 115–134.
- Stroman, Richard O./Edwards, Daniel J./Jenkins, Phillip/Carter, Sam/Newton, Daniel/Kelly, Matthew/Heinzen, Stearns/Young, Trent/Dobrokhodov, Vladimir/Langelaan, Jack/Bird, John/Reinecke, P Alex (2018) : *The Hybrid Tiger. A Long Endurance Solar/Fuel Cell/Soaring Unmanned Aerial Vehicle*, paru dans : *Power Sources Conference* 19, p. 317–320.
- Taibi, Emanuele/Miranda, Raul/Carmo, Marcelo (2020) : *Green hydrogen cost reduction*, <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>, dernière consultation le 15/11/2021.
- US Department of Defense (2016) : *2016 Operational Energy Strategy*, https://www.aq.osd.mil/eie/Downloads/0E/2016%20OE%20Strategy_WEBd.pdf, dernière consultation le 13/10/2021.
- Wang, Anthony/van der Leun, Kees/Peters, Daan/Buseman, Maud (2020) : *European Hydrogen Backbone. How dedicated hydrogen infrastructure can be created*, Guidehouse : Utrecht.
- Zhou, Youjie/Lu, Changbo/Cheng, Jian/Xu, Wanli/Sun, Yanli/Li, Hua/Xu, Lei (2021) : *Development of Hydrogen Fuel Cell Technology and Prospect for Its Military Application*, paru dans : Liang, Qilian/Wang, Wei/Liu, Xin/Na, Zhenyu/Li, Xiaoxia/Zhang, Baoju (éditeurs), *Communications, Signal Processing, and Systems*. Springer Singapore : Singapour, p. 1722–1730.