

LIVRE BLANC

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DES ARMÉES

Enjeu majeur et opportunités d'innovation



Mars 2023

Transition énergétique des armées

Enjeu majeur et opportunités d'innovation

Table des matières

REMERCIEMENTS	03		
EDITO	04		
INTRODUCTION	05		
Partie 1 : Constats et enjeux	06		
1. La prise de conscience de l'urgence climatique	07		
Transition énergétique, dépendance et tensions à l'échelle mondiale			
La France: Neutralité carbone à horizon 2050			
2. Décarboner les armées	11		
Politiques législatives et normatives			
Investissements réalisés			
Les défis à relever pour les armées			
Prises d'engagement			
Partie 2: Opportunités d'innovation	21		
3. Les moyens pour accélérer la transition énergétique	22		
Energies bas-carbone			
Biocarburants et e-fuels			
		2. Le stockage de l'énergie: Un élément clé pour permettre la transition	44
		Les différents moyens de stockage	
		Tableau comparatif des solutions de stockage	
		Partie 3:	49
		Décarbonation et défense	
		1. Solutions de mobilité décarbonée	51
		L'usage de bio-carburants et e-fuels	
		L'usage prometteur de l'hydrogène	
		2. Réflexions en cours sur la décarbonation des infrastructures militaires: Les spécificités des infrastructures de la défense	54
		3. Une dimension RH au cœur de la transition	56
		CONCLUSION	58
		Annexes	60
		Références	66

REMERCIEMENTS

Nous avons créé Mind2Shake en 2020 avec comme aspiration de contextualiser les innovations avec les cas d'usages clients. Notre trajectoire tout d'abord uniquement numérique, s'est progressivement tournée vers l'énergie et la décarbonation tant ces sujets sont d'importance pour le monde digital.

La rédaction de ce livre blanc sur la transition énergétique des armées dépasse les simples perspectives qu'il évoque grâce à la qualité du travail accompli pour sa rédaction.

Nous remercions les personnes que nous avons interrogées qui ont eu à cœur de nous aider à faire un bond en avant dans la bonne direction et à initier une réflexion approfondie sur les solutions innovantes pour faire avancer les armées françaises vers un avenir plus durable. Par la publication de ce livre blanc, nous souhaitons rendre hommage aux initiatives individuelles et collectives prises sur le territoire français en faveur de la transition énergétique. Cet engagement est reflété dans tous les témoignages collectés et analysés pour la rédaction de ce livre blanc par **Marine Perard**, à qui nous adressons nos très vifs remerciements.

Merci à Laurent DESFOURNEAUX, Christian JACQUES, Stéphane HENRIOT, Sébastien MEUNIER, Christine GEORGE, Stéphane PAUL, Aliette QUINT, Jérôme LAFITTE, Yoann CARMICHAEL, François REPTIN de s'être prêtés au jeu de notre interrogatoire.

Christophe Delhaise et Karim Mazoir



EDITO

Cher lecteur,

Nous vivons à l'heure actuelle une période de grands bouleversements en matière d'énergie. Les défis environnementaux sans précédents auxquels nous faisons face nous incitent à entreprendre une réflexion sur la manière dont nous produisons et consommons de l'énergie. Parce qu'il est urgent d'agir, la préoccupation des enjeux énergétiques s'apprête à rejoindre les rangs des priorités de l'armée française.

Il apparaît évident pour des raisons écologiques mais aussi budgétaires que les armées, qui consomment une quantité considérable d'énergie pour mener à bien leurs missions, doivent s'atteler dès aujourd'hui à réduire leur consommation en énergie. Par ailleurs, la guerre en Ukraine a révélé notre vulnérabilité opérationnelle et logistique face à l'approvisionnement en énergie. C'est pourquoi, il est impératif de trouver des solutions énergétiques durables qui garantiront l'efficacité opérationnelle de nos armées tout en réduisant son impact environnemental.

Heureusement, la France est une terre d'innovation. Il existe de nombreuses solutions innovantes dans le monde civil à la portée du ministère des armées pour accélérer sa transition énergétique. Valoriser la technologie par les usages, c'est la mission que s'est donnée Mind2Shake depuis sa création en 2020. C'est parce que nous croyons en la capacité de notre écosystème français et européen à collaborer intelligemment pour faire progresser l'innovation que nous œuvrons au quotidien pour « faire autrement ».

Ce livre blanc a pour objectif de vous présenter les enjeux et solutions afin d'accélérer la transition énergétique des armées françaises. Nous espérons qu'il vous inspirera une réflexion sur la manière de faire face à ces défis et opportunités et qu'il vous permettra d'identifier des solutions énergétiques d'avenir.

Ensemble, nous pouvons bâtir un avenir plus durable pour nos armées et pour notre planète.

L'équipe de Mind2Shake.

INTRODUCTION

ACCOMPAGNER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DES ARMÉES

Le monde fait face à de multiples défis en matière de durabilité énergétique. La décarbonation est devenue un enjeu majeur pour tous les secteurs de notre société. Le réchauffement climatique est en train de modifier les environnements, dans lesquels évoluent nos armées.

Un monde plus chaud engendre forcément un monde plus violent, instable et imprévisible. Il entraîne avec lui des besoins en nouveaux matériels, nouveaux modes d'action et des modes d'approvisionnement en énergie différents.

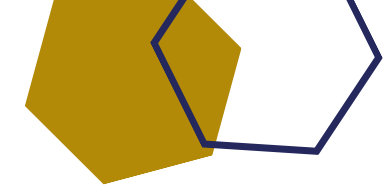
Historiquement, les armées ont su être le fer de lance de nombreuses technologies. En tant qu'organisation consommatrice d'énergie, l'armée française a un rôle important à jouer comme plateforme d'innovation pour faire accélérer la transition énergétique dans tous les domaines. En outre, celle-ci représente par ailleurs une opportunité pour le ministère des Armées de repenser entièrement son organisation ainsi que son mode de fonctionnement.

C'est dans ce contexte que nous avons rédigé ce livre blanc sur la transition énergétique des armées. Nous avons rassemblé des informations, synthèse de recherches bibliographiques et d'entretiens avec des actrices et acteurs des domaines militaire et civil, afin de proposer une mise en perspective des solutions et initiatives innovantes qui pourront accompagner le ministère des Armées à accélérer sa démarche de transition énergétique.

Notre objectif est de mettre en lumière de nouvelles sources d'énergies, leurs technologies et écosystèmes associés qui pourraient répondre aux besoins du ministère des Armées dans le contexte de sa transition énergétique, ainsi que proposer quelques pistes pour concrétiser ces solutions.

A la lecture de ce livre blanc, vous trouverez de prime abord un détail des constats et enjeux de la transition énergétique pour nos armées françaises. Dans un second temps, nous proposons un état des lieux que nous avons essayé de rendre le plus large possible des innovations civiles et militaires qui peuvent accélérer la transition énergétique. Nos pistes de réflexions sur la décarbonation du secteur de la défense sont présentées dans le troisième chapitre de ce livre blanc.

Bonne lecture !



CONSTATS ET ENJEUX

1 La prise de conscience de l'urgence climatique

Transition énergétique, dépendance et tensions à l'échelle mondiale 07

La France: Neutralité carbone à horizon 2050 09

.....

2 Décarboner les armées

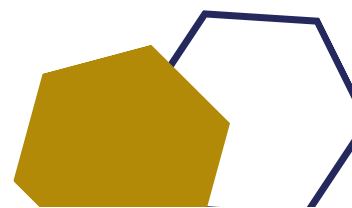
Politiques législatives et normatives 11

Investissements réalisés 15

Les défis à relever pour les armées 16

Prises d'engagement 18

.....



CONSTATS ET ENJEUX

La prise de conscience de l'urgence climatique

Le changement climatique se définit comme: Une «variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité

de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus» (GIEC, 2013) ou des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.» (Nations Unies, 2013, p.107).



Les experts du GIEC sont catégoriques : notre système climatique se réchauffe! Les plus climatoseptiques expliqueront qu'il s'agit d'un phénomène classique pour notre planète mais ce réchauffement a de particulier qu'il est fortement accéléré et intensifié par l'Homme. Les répercussions sur notre civilisation sont très graves au point de changer en profondeur notre mode de vie dans un temps très restreint, de l'ordre de quelques décennies. Les principales conséquences du réchauffement climatique observées scientifiquement sont: le réchauffement de l'atmosphère et des océans, une diminution de la couverture de neige et de glace, une élévation du niveau des mers et une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GIEC, 2021). Les experts prévoient au cours du 21ème siècle une augmentation probable de la température moyenne de la planète de 1.5° C à 2°C si des réductions massives de gaz à effet de serre ne sont pas effectuées dans les décennies à venir (IPCC, 2021).

Transition énergétique, dépendance et tensions à l'échelle mondiale

Les répercussions du réchauffement climatique sont importantes partout dans le monde et dans tous les domaines. C'est pourquoi de nombreux pays ont décidé de mettre en place des politiques de transition écologique pour aller vers un modèle économique de développement durable et social. Au cœur de ces politiques, le sujet de l'énergie prend une place importante dans les débats internationaux. En effet, l'énergie est un des premiers piliers à considérer dans une démarche de transition vers un modèle durable. Les énergies utilisées actuellement sont majoritairement fossiles (gaz, pétrole, charbon), donc émettrices de gaz à effet de serre et non renouvelables. Si la transition énergétique est si compliquée, c'est que l'énergie est un pilier de notre société, facteur de croissance.



Elle permet d'alimenter les infrastructures, les transports, les machines etc. Ainsi, la transition énergétique vers des sources d'énergies bas-carbone et renouvelables doit garantir la réponse aux besoins mondiaux en énergie. Les énergies fossiles que sont le pétrole, le gaz et le charbon répondent aux besoins des sociétés depuis de nombreuses décennies. Elles possèdent des avantages importants: leur cycle d'extraction, de transport, de distribution et d'utilisation est maîtrisé, les coûts sont attractifs et la densité énergétique est intéressante. Les gisements de pétrole facilement exploitables (car accessibles donc peu coûteux) ont tous été découverts. Les énergies fossiles, en plus d'être des ressources finies sont extraites dans des gisements inégalement répartis dans le monde, ce sont des ressources stratégiques soumises à de fortes tensions comme l'illustre le conflit ukrainien.

Le monde se trouve dans une situation paradoxale: les stocks d'énergie fossiles se réduisent, le besoin de transition énergétique s'accélère mais la demande en énergie fossile augmente. Les besoins énergétiques mondiaux devraient augmenter de 30% d'ici 2040 pour un mix énergétique mondial comprenant 80% d'énergies fossiles (Assemblée Nationale, 2021).

Face à cette situation, de nouveaux procédés se développent comme l'extraction de pétrole de schiste aux Etats-Unis, au Canada ou en Arctique mais ces initiatives ne s'inscrivent pas dans une démarche durable. La ressource de transition entre le pétrole et les énergies renouvelables pourrait être le gaz, énergie fossile possédant la plus faible émission de GES et dont les réserves pourraient encore durer un siècle (contre 30 ans pour les réserves de pétrole) (Assemblée Nationale, 2021).

Le gaz est ainsi devenu un enjeu géopolitique majeur, vecteur de tensions, notamment entre les Russes et les Américains. Hormis quelques exceptions telle que la Norvège, la plupart des zones de production de pétrole sont des zones de tensions géopolitiques. C'est par exemple le cas des îles et atolls de la mer de Chine méridionale, riche de ressources halieutiques et de possibles gisements de pétroles (et de gaz). Ce territoire fait l'objet de revendications de la Chine, du Vietnam, des Philippines, de l'Indonésie et de Brunei (Bafail, 2014). Le transport d'énergie est lui aussi sujet à de fortes tensions. Plus de 60% des échanges pétroliers mondiaux et la majorité des échanges de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) se font par voie maritime. Garantir la sûreté de ces espaces d'échanges, souvent théâtres de tensions régionales, est devenue indispensable.

L'Union Européenne produit 42% de son énergie et importe les 58% restants. Sa consommation d'énergie repose majoritairement sur les produits pétroliers (34.5% du mix énergétique en 2020) et sur le gaz (23.7% du mix énergétique en 2020) (Eurostat, 2022). Dans un contexte de tensions géopolitiques et de transition énergétique, l'UE doit trouver de nouvelles sources d'énergie afin de prendre le pas de la durabilité tout en restant indépendante et souveraine face aux puissances étatsuniennes, russe et chinoise.





Parmi les opportunités d'exploitation d'énergies bas-carbone, on retrouve les énergies renouvelables sur lesquelles la recherche progresse et de nouvelles solutions émergent. Toutefois, elles sont techniquement et technologiquement peu abouties. Par ailleurs, le matériel nécessaire tel que les batteries pour le stockage, les panneaux photovoltaïques, etc. nécessite pour sa fabrication des ressources critiques comme le cobalt et des métaux précieux. L'Europe est totalement dépendante de pays extérieurs pour l'approvisionnement de ces ressources



Le cobalt, par exemple, provient majoritairement des mines de République Démocratique du Congo (60% de la production mondiale), où les conditions de travail sont très éloignées du règlement européen T3G entré en vigueur le 1^{er} janvier 2021. Ces mines sont d'ailleurs majoritairement dirigées par les investissements chinois. Sur 27 autres métaux critiques, l'Union Européenne en importe 97%. En ce qui concerne les terres rares, les pays développés se sont désengagés de la chaîne de valeur à cause de la pollution produite. Ce sont donc les industries asiatiques, aux réglementations environnementales plus souples et aux coûts de main d'œuvre plus faibles qui ont récupéré l'industrie, leur donnant un pouvoir considérable. La réouverture de mines européennes paraît peu envisageable à l'heure actuelle, le savoir-faire s'étant perdu et les contraintes écologiques étant trop importantes (Bafoil, 2014).

La communauté internationale et notamment Européenne se trouve donc dans une situation où elle doit accélérer sa transition énergétique sans perdre d'indépendance et d'autonomie dans sa démarche d'approvisionnement. L'innovation est donc au cœur de la transition énergétique à l'échelle mondiale.

La France: Neutralité carbone à horizon 2050 ?

Bien que le la **transition énergétique** soit une nécessité mondiale, chaque pays choisit sa manière d'y répondre. La France a donné des objectifs de transition écologique ambitieux, à l'échelle globale ou à destination des armées.

Un de ses fils rouges est la neutralité carbone pour 2050. Cet objectif s'inscrit dans un climat de tensions: tensions environnementales (catastrophes écologiques), tensions sanitaires (pandémie mondiale), le retour de la guerre en Europe (conflit ukrainien) et retour des rapports de force entre puissances (rivalités sino-américaines). Ces tensions toutes confondues ont mis en exergue la dépendance de la France et la fragilité de ses chaînes d'approvisionnement. Il est nécessaire de prendre en compte les liens systémiques entre ces tensions pour élaborer une réponse adéquate (Autellet, 2022). De nombreux défis attendent la France et notamment le ministère des armées pour accompagner la transition énergétique. Des actions doivent être mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique malgré la difficulté du contexte.

L'impulsion en faveur de la transition énergétique doit provenir en premier lieu des politiques législatives et normatives.



En France, la loi de 2015, relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) fixe plusieurs objectifs nationaux parmi lesquels :

RÉDUIRE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE FINALE DE 20% PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE 2012, ET DE 50% EN 2050

RÉDUIRE DE 30% LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE PRIMAIRE D'ÉNERGIES FOSSILES EN 2030 PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE 2012

ATTEINDRE 32% D'ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA CONSOMMATION FINALE BRUTE D'ÉNERGIE EN 2030

La LTECV introduit également la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), révisée en 2018-2019, qui consiste à établir une feuille de route pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et à réduire l'empreinte carbone des Français. La SNBC donne des orientations dans tous les secteurs d'activité pour accélérer la transition énergétique et atteindre un modèle de consommation bas-carbone, durable et circulaire. Dans le secteur des transports, elle fixe ainsi l'objectif de réduire d'ici 2028 de 29% les émissions de GES par rapport à 2013. Dans le secteur des bâtiments, l'objectif de réduction est de 54%. Il convient cependant de rappeler que les activités opérationnelles des armées bénéficient de dérogations, ou n'entrent pas dans les objectifs annoncés par la LTECV.



2. Décarboner les armées

Politiques législatives et normatives

Depuis une dizaine d'années, des politiques de transition écologique et énergétique sont déclinées dans le secteur de la défense. Dès 2012, la Stratégie Ministérielle de Performance Énergétique (SMPE) avait pour objectif d'adapter les activités du ministère chargé de la Défense aux évolutions du domaine de l'énergie sur la période 2012-2017. L'objectif était de mettre en relation les acteurs concernés du ministère et proposer un document de référence pour les politiques de performance énergétique des armées. La **SPME** a mis en lumière cinq axes sur lesquels se concentrer à court, moyen et long terme: l'achat, la gouvernance, la connaissance, l'autonomie et la rationalisation. Le bilan est relativement positif: la consommation d'énergie hors carburants opérationnels a été réduite de 15% entre 2010 et 2018, et la part des énergies fortement carbonées que sont le charbon et le fioul du mix énergétique diminue de 22% à 15% au profit d'énergies faiblement carbonées telles que la biomasse/bois, le gaz de pétrole liquéfié ou la chaleur des réseaux urbains, qui voient leur part augmenter de 2% à 7% (Fievet et Santiago, 2021).

Sur la période 2016-2020, la **Stratégie de Défense Durable** (SDD), a permis l'identification de plusieurs mesures phares à mettre en place pour réduire l'impact environnemental des infrastructures militaires en métropole. On retrouve:

- **Sécuriser l'apport énergétique des sites sensibles**
- **Impliquer davantage les prescripteurs du ministère** en ce qui concerne les opérations de conception et démantèlement des équipements
- **Sensibiliser les agents et valoriser les comportements économes**
- **Connaître la consommation énergétique** pour la réduire et en améliorer la performance



Cette approche a permis notamment de mettre en place des **clauses environnementales** dans une majorité de contrats.

La **SMPE** suivante couvre la période 2020-2023. Cette feuille de route présente **18 objectifs** regroupés autour de deux engagements : Réduire la consommation énergétique et développer les énergies renouvelables. Le 25 septembre 2020, la ministre des Armées **Florence Parly** a d'ailleurs annoncé une stratégie énergétique de défense. Celle-ci entraîne un changement de gouvernance permettant de mieux coordonner et réaliser les actions dédiées à la transition. Cette nouvelle gouvernance comprend deux niveaux principaux : « **un comité exécutif** (COMEX), qui se réunit une fois par an, ou sur décision de la ministre des Armées, pour arbitrer les grandes décisions en matière de transition énergétique ; et un **comité ministériel énergie** (CME), qui se réunit une à deux fois par an afin de coordonner et d'organiser la mise en œuvre de la stratégie énergétique de défense » (Fievet et Santiago, 2021). La SPME de 2020 met également en exergue **quatre** nouveaux **piliers** thématiques, centrés sur divers aspects de l'énergie (Fievet et Santiago, 2021) :



Pilier relations internationales et stratégie (Direction générale des relations internationales et de la stratégie)

Redonner une souveraineté technologique ainsi qu'une autonomie stratégique à la France et à l'UE

- Analyse stratégique des enjeux géopolitique de l'énergie pour garantir la sécurité de la consommation du ministère des armées
- Identification des zones géographiques où l'énergie est un facteur structurant afin de sécuriser les flux d'approvisionnement
- Cartographie des sources et filières d'approvisionnement de minerais stratégiques avec l'appui de la Direction Générale de l'Armement (DGA) et de l'Etat-Major des Armées



Pilier énergie opérationnelle (Service de l'Energie opérationnelle de l'Etat Major des Armées)

Valoriser la transition énergétique et coordonner les actions du MINARM

- Reprendre les missions du SEA agrandies de toutes les questions relatives aux énergies nécessaires aux fonctions opérationnelles des armées, hormis l'énergie nucléaire
- Valoriser la transition énergétique comme un facteur de résilience et un atout opérationnel
- Coordonner les actions des différents acteurs du ministère des Armées agissant pour la transition énergétique



Pilier capacitaire et innovation (Direction Générale de l'Armement et Agence de l'Innovation de Défense)

Stimuler l'innovation et la cohérence entre les initiatives en matière d'énergie capacitaire

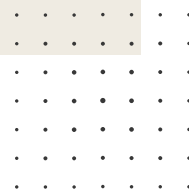
- Elaborer les choix en matière d'énergie sur le plan capacitaire
- Assurer la cohérence des actions et des coopérations touchant à l'énergie dans les plans et programmes d'armement
- Soutenir l'effort d'innovation en matière de transition énergétique



Pilier énergie des infrastructures (Service d'Infrastructure de la Défense)

Accélérer la transition énergétique des infrastructures du MINARM

- Traiter l'ensemble des questions relatives aux énergie consommées par le parc immobilier du ministère des Armées et ses équipements



La dernière **politique nationale de défense** en date est la «stratégie climat et défense» d'avril 2022, élaborée par le ministère des Armées. Cette stratégie possède une approche globale, autour de quatre axes :

Développer les connaissances et les capacités d'anticipation sur les enjeux stratégiques du changement climatique.

Engager une dynamique d'adaptation de l'outil de défense aux bouleversements prévisibles induits par le changement climatique.

Poursuivre la contribution du ministère des Armées aux efforts collectifs en matière d'atténuation et de transition énergétique.

Développer les connaissances et les capacités d'anticipation sur les enjeux stratégiques du changement climatique.





En tant que première puissance militaire de l'Union Européenne, la France joue un rôle leader dans la négociation d'accords internationaux au profit de la transition énergétique. Ainsi, le ministère des armées travaille en étroite collaboration avec l'**Agence Européenne de Défense (AED)**. Fondée en 2004, elle est constituée de 26 Etats membres de l'UE et a pour but de faciliter la coopération et l'émergence d'initiatives communes pour l'amélioration des capacités de défense, qu'elles soient nationales ou européennes. L'AED agit de plus en plus en faveur de la transition énergétique des Armées Européennes.

L'AED s'appuie sur le **"Consultation Forum for Sustainable Energy in the Defense and Security Sector (CF SEDSS)"**, financé par la commission européenne. L'objectif est de mettre en place une stratégie énergétique commune aux armées de l'UE. Ce forum, en plus des 26 Etats membres de l'AED, est constitué de la Suisse, la Norvège, la Serbie et l'Ukraine ainsi que de l'OTAN en observateur

L'UE avait introduit le réchauffement climatique comme risque sur la sécurité en 2008. En 2022, pour la première fois, elle a officiellement adopté une stratégie défense et climat qui pose des objectifs clairs, des dates limites à respecter, et invite fortement les Etats Membres à rédiger leur stratégie nationale climat et défense en s'appuyant sur 4 axes (General Secretariat of the Council, 2022; Migoux, 2022):

Renforcer sa prospective stratégique

Agir plus rapidement pour être mieux préparé

Réduire ses dépendances

Encourager la coopération et le partenariat

De son côté, en 2021, l'**OTAN** a élaboré un agenda sur le changement climatique et la sécurité proposant des **«mesures visant à renforcer la prise de conscience, au sein de l'OTAN et de ses pays membres, des incidences du changement climatique sur la sécurité»**. Il instaure des mesures «d'adaptation et d'atténuation» pour «une ouverture plus poussée» vers la prise de conscience du réchauffement climatique «sans compromettre la crédibilité de la posture de dissuasion et de défense de l'Alliance ni remettre en question les priorités que sont la sécurité du personnel militaire, l'efficacité opérationnelle et l'efficacité» (OTAN, 2021).

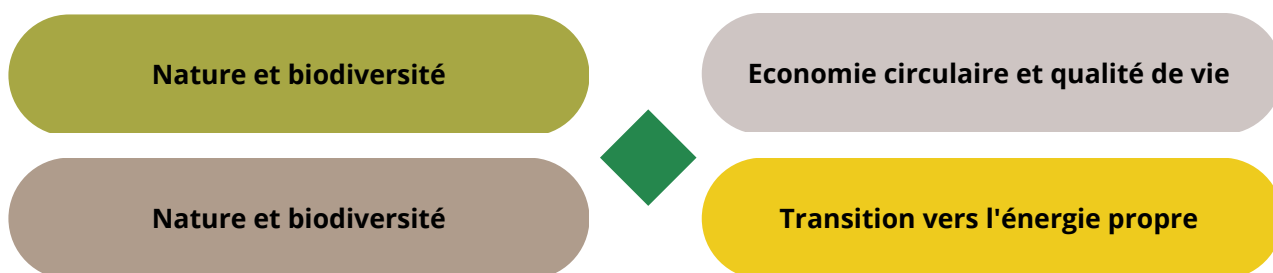


Investissements réalisés

Ces dernières années, la mise en place de politiques **législatives** et **normatives** en faveur du climat s'est accompagnée d'une augmentation d'investissements dédiés à favoriser la transition énergétique. En effet, les investissements mondiaux dans les sources d'énergie alternatives n'ont cessé d'augmenter, jusqu'à dépasser les **500 milliards de dollars** en 2020 (IFPEN and Bloomberg NEF, 2021, annexe 2). Malgré ces sommes, pour rester en dessous de la limite du réchauffement climatique de 2°C, il faudrait **1500 milliards de dollars** d'investissement dans les technologies bas-carbone.

A l'échelle européenne, dans le contexte du programme de recherche «Horizon 2020», 5.9 milliards d'euros ont été alloués à la recherche sur l'énergie durable sur la période 2014-2020. Son successeur «Horizon Europe» alloue **15.1 milliards d'euros** au climat, à l'énergie et à la mobilité sur la période 2021-2027 (Fievet et Santiago, 2021). Par ailleurs, la **Commission européenne** a créé le fonds d'investissement Life à destination de projets publics ou privés s'inscrivant dans le développement durable.

Life, ce sont 5.4 milliards d'euros sur la période 2021-2027 dédiés aux quatre axes



Ce dernier axe se voit alloué **997 millions** d'euros

Il convient de noter que le Fonds Européen de Défense, successeur du **European Defense Industrial Development Program** (EDIDP) n'a fixé aucun objectif dans la base juridique de contribution à l'action pour le climat. Néanmoins, cela n'empêche pas des programmes ayant des effets directs ou indirects de lutte contre le changement de recevoir des fonds.

Enfin, à l'échelle nationale, le **Fonds d'Intervention pour l'Environnement** (FIE), créé en 1994, permet de financer des projets de protection de l'environnement au sein du ministère des Armées. Sa dotation est passée de 1 à 2 millions d'euros depuis 2019.

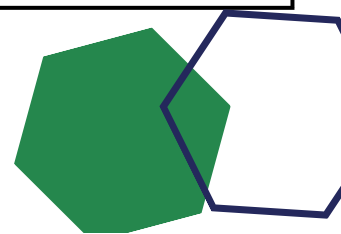
Les défis à relever pour les armées

Les initiatives politiques et d'investissement ne suffisent pas à régler à elles seules la question d'une gestion durable et responsable de l'énergie pour le ministère des armées. De nombreux défis sont à relever. Le ministère des armées doit faire face à des risques associés à sa consommation d'énergie (voir tableau ci-dessous). Il doit aussi travailler à la réduction de sa dépendance vis-à-vis de l'approvisionnement tout en pensant activement à la réduction de sa dépense énergétique, la refonte de sa logistique et l'acquisition de nouvelles compétences.



Les risques associés à la consommation d'énergie pour le ministère des armées sont regroupés en **5 catégories** distinctes (Stratégie Énergétique de défense, 2020):

Les risques géopolitiques	Instabilité des zones de production et de transit Volatilité des prix des matières premières Nouvelles dépendances aux métaux critiques
Les risques normatifs	Coût financier des normes Pression normative environnementale Difficulté à faire valoir les besoins dérogatoires
Les risques technologiques	Dépendance technologique Incompatibilité matériels-énergie Retard et déclassement technologique Cybermenaces sur la souveraineté et la sécurité des données
Les risques hybrides	Menaces cyber Menaces terroristes Interdépendance des secteurs stratégiques
Les risques environnementaux	Tension sur les ressources énergétiques et agraires Dérèglement climatique impactant les interventions militaires. Influence de l'opinion publique sur la politique environnementale



En dépit de la nécessité d'accélérer la transition énergétique, les besoins en énergies de l'armée sont en croissance : robotisation, développement de drones, d'armes et matériels énergivores (capteurs, ...), climatisation en **OPEX**. Le besoin en électricité augmente lui aussi : hybridation, informatisation et développement de la simulation. Cette augmentation des besoins vient se confronter à la nécessité pour la France d'être souveraine, tant sur ses approvisionnements que sur sa technologie.

Réduire la consommation énergétique des armées :

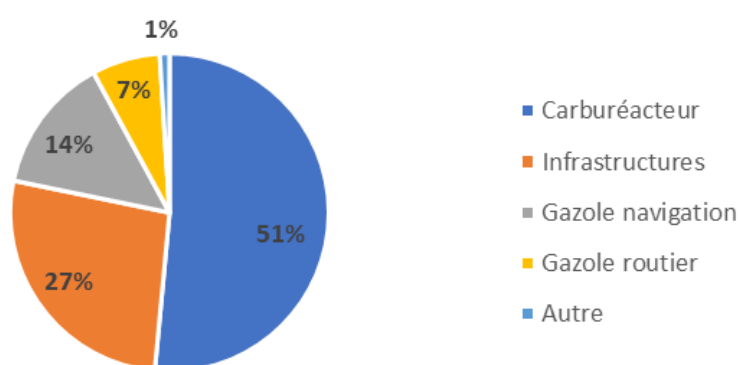
Le ministère des Armées est le premier propriétaire foncier et premier utilisateur du domaine de l'Etat (270 000 hectares gérés en métropole). C'est également le premier consommateur public d'énergie avec **360 000 tonnes** équivalent pétrole consommées hors carburant opérationnel.

Il est aussi à l'heure actuelle le premier consommateur de carburant et présente la plus importante empreinte environnementale de l'Etat (Fievet et Santiago, 2021 ; Lafitte, 2022). Cette dépense énergétique représente une empreinte environnementale conséquente et un coût économique non négligeable. Une stratégie de sobriété et d'efficacité énergétique apporte donc un bénéfice à la fois écologique et économique.

En **2019**, le ministère des Armées a consommé 835 000 m³, ce qui lui a coûté 667 millions d'euros. En terme d'électricité, **2.6 térawatts heure** délivrés aux infrastructures ont eu un coût de **222 millions d'euros**.

La répartition de la consommation par usage du ministère des armées donne des indications sur les leviers où il doit agir en priorité (graphique 2). Le premier enjeu est celui de la mobilité qui représente **75%** de la consommation dont **51%** uniquement pour le carburéacteur.

Graphique 2 : Répartition de la consommation en énergie du MINARM par usage



La filière du carburant, moteur de la mobilité des armées, est relativement « simple » : achat de produits finis, stockage, maintien en qualité, distribution (par pipelines, voie ferrée, camion-citerne). La volonté de simplifier la filière se retrouve aussi au travers du concept de carburant unique développé par l'**OTAN** et adopté par la France. Il s'agit d'utiliser un seul produit, le carburéacteur, pour les aéronefs et les matériels terrestres (véhicules, groupes

électrogènes) à moteur thermique fonctionnant au diesel. Ainsi, en opération, il est possible de ne déployer qu'une chaîne de soutien carburéacteur pour adresser l'ensemble des mobilités, limitant ainsi l'empreinte logistique des forces déployées. La disponibilité de ce produit est garantie partout dans le monde par les besoins de l'aéronautique civile et la réglementation stricte (spécification, normalisation) relative à ce produit donne aux armées l'assurance de trouver du produit de qualité quel que soit la zone dans laquelle elles se déploient. Quel que soit le théâtre d'opération il est ainsi possible de déployer une logistique efficiente.

La réduction des carburants fossiles nécessitera de repenser la logistique. L'introduction d'une nouvelle technologie /nouvelle énergie plus respectueuse de l'environnement ne devra pas impacter l'efficacité de la chaîne logistique au risque de rendre l'initiative contre-productive (Lafitte, 2022).

Acquérir de nouvelles compétences: Pour aller de pair avec les actions en faveur de la transition énergétique, l'acquisition de nouvelles compétences et la création de nouveaux postes sont nécessaires.

Certains ont d'ailleurs déjà été créés au sein du **MINARM**. Par exemple, en termes de gouvernance, le Haut Fonctionnaire au développement durable (**HFDD**) est chargé de veiller à la cohérence entre la stratégie nationale et celle du ministère (Fievet et Santiago, 2021). En plus, les compétences en développement durable doivent être ancrées dans les différents domaines, avec des référents performance énergétique et déchets dans les bases de défense. Il faudra donc dans un avenir proche recenser et recruter des profils possédant des compétences en développement durable afin de les répartir dans les différentes activités et installations. Par exemple, le **SID** déploie actuellement 137 chargés d'environnement.



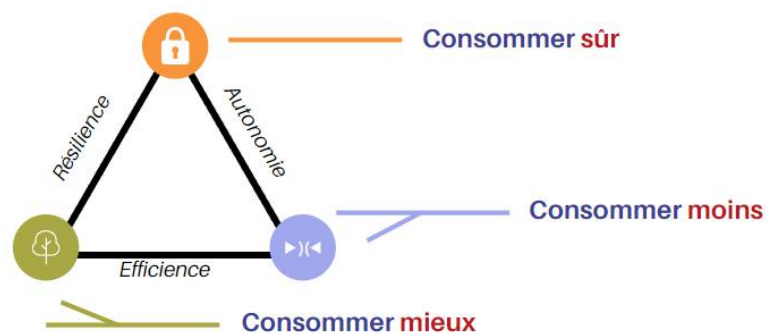
L'AID aurait également besoin de ces ressources humaines pour repérer les start-ups et autres entités qui pourraient accompagner le MINARM dans sa transition énergétique. Par ailleurs, la digitalisation qui pourrait permettre au ministère des armées de mieux assurer la gestion de sa consommation amène avec elle de nouveaux risques cybers qu'il convient d'adresser avec les ressources humaines compétentes.

Prises d'engagement

Pour répondre à la **transition énergétique**, en 2020, le ministère des Armées a pris plusieurs engagements et met l'accent sur trois points cardinaux: consommer sûr, moins et mieux (*Graphique 3, Stratégie énergétique de Défense, 2020*).

Pour consommer sûr, le ministère des armées met l'accent sur la sécurisation de l'accès à l'énergie et le renforcement de ses compétences en protection de la donnée et en **cyberdéfense** des infrastructures énergétiques.

Graphique 3: Le trilemme énergétique: Objectif du ministère des Armées



Source: Dossier de Presse, Stratégie Énergétique de Défense, Ministère des armées, 27/10/2020, 27.10.2020 Stratégie énergétique de défense.pdf (defense.gouv.fr)



Pour **consommer moins**, le ministère des Armées souhaite maîtriser sa consommation en développant en son sein la culture de la sobriété énergétique et numérique. Pour se faire, il forme et sensibilise son personnel.

La culture de la sobriété a été rajoutée aux programmes d'enseignement dans les écoles et centres de formation. Il s'agit d'un atout-clé pour atteindre l'efficacité énergétique. La maîtrise de la consommation passe aussi par la rationalisation des ressources énergétiques.



Pour les infrastructures, des outils numériques de mesure d'analyse des consommations ont été implémentés fin 2021. Des Contrats de Performance Energétique (CPE) ont été mis en place dont le but est d'améliorer la performance énergétique des bâtiments par l'optimisation de l'exploitation des systèmes de production et de distribution d'énergie. Le premier a été signé avec Dalkia Smart Building en 2011 pour le site de Chambéry Roc Noir abritant le 13^e bataillon de chasseurs alpins. Il a permis la rénovation de 30 bâtiments, l'emploi d'énergies renouvelables pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (en 2021, 58% des besoins énergétiques du site sont assurés par les énergies renouvelables) et l'implémentation d'une gestion technique centralisée pour suivre et optimiser les performances énergétiques des bâtiments.



Le bilan étant positif, avec une économie d'énergie du site de 46% qui représente un gain de **200 000 euros** par an ainsi que la réduction de 50% des émissions de CO₂, le ministère a décidé de renouveler l'opération, sur le camp de la Valbonne ou les sites de Balard. Sur la période 2020-2025, il souhaite notifier douze contrats de performance énergétique.

Pour les systèmes d'armes, le projet **Gestion Énergétique Optimisée des plateformes militaires** (GENOPTAIRE) lancé par la **DGA** a pour objectif la définition des données spécifiques à collecter pour chaque mission. Le but est d'obtenir une gestion énergétique optimisée, en passant notamment par une méthodologie commune aux 3 armées, à un carburant unique ou encore la définition d'indicateurs pertinents (Key Performance Indicators).

Une autre initiative a été lancée, recourir au système de pilotage **Smart Grid** pour optimiser l'usage et le stockage de l'électricité. Enfin, les armées s'appuient également sur la simulation et l'évaluation des besoins énergétiques pour pouvoir les anticiper. Pour la simulation par exemple, les pilotes s'entraînent autant que possible sur simulateur pour éviter de consommer du carburéacteur.

Pour consommer mieux, le ministère des armées mise sur l'emploi d'innovation et l'usage de carburants de nouvelles génération plus efficaces. Pour se faire, il s'appuie sur la **Base Industrielle et Technologique de Défense** (BITD). Un des premiers objectifs fixés est la propulsion hybride des véhicules terrestres. En 2022, un démonstrateur d'hybridation a permis de fournir les critères pour une motorisation les Griffons et VBCI qui seront livrés entre 2028 et 2030. Au-delà des avantages en matière de développement durable, l'hybridation devrait aussi permettre d'atteindre un surcroît de puissance électrique pour le franchissement et une meilleure furtivité. Sur le champ de bataille, l'hybridation présente aussi l'avantage de réduire la dépendance des forces à l'approvisionnement en carburant. La guerre en Ukraine l'illustre avec des forces Russes qui ont perdu l'usage de plus de **200 chars**, en partie en raison des difficultés d'approvisionnement en carburant dues aux attaques Ukrainiennes sur les convois logistiques. Le constructeur français *Arquus* travaille actuellement à l'hybridation de ses véhicules blindés.

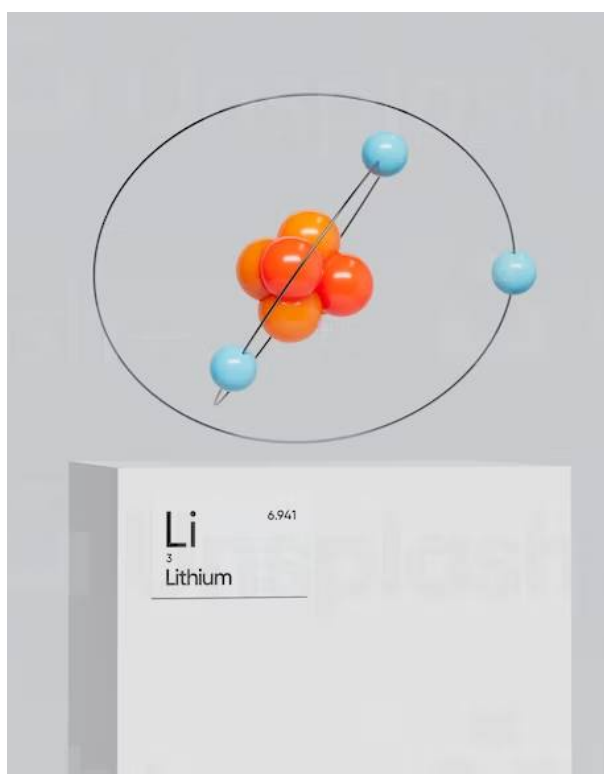
“

« Pour l'hybridation des chars, nous disposons de deux composants essentiels : une batterie lithium-ion et une machine capable de produire de fortes quantités d'énergie. Une batterie lithium-ion peut être chargée à deux fois sa capacité, et en trente minutes seulement, avec une machine adaptée. Nous disposons de cette machine qui produit au moins 60 kW, moteur au ralenti. Ce qui est énorme »

”

François Deloumeau

Dans un entretien pour la revue DefTech



Outre l'hybridation des véhicules, il s'agit aussi de revoir l'alimentation en énergie des infrastructures militaires dans leur ensemble, qu'elles soient permanentes, provisoires ou déployées en **OPEX**. En effet, actuellement ce sont des groupes électrogènes fonctionnant au gazole qui alimentent ces infrastructures. Cela entraîne des nuisances sonores et olfactives, des failles de sécurité et une logistique contraignante. Le SID souhaiterait donc mettre en place des infrastructures autonomes déployées en OPEX, but principal du projet d'écocamp. Ce projet est porté par le **Centre d'Expertise des Techniques de l'Infrastructure de la Défense** (CETID), une des branches du SID, et ses objectifs sont la réduction de la consommation en eau et en énergie, et le développement de modes de production alternatifs de ces ressources, l'optimisation de nouveaux équipements, le tout en veillant à intégrer les besoins des armées. Pour cela, le CETID réfléchit à différentes sources d'énergie, à mettre en place un mix énergétique piloté par une smart grid, de manière à optimiser la consommation énergétique, à améliorer l'isolation des bâtiments, levier essentiel à la performance énergétique, ou encore développer le stockage de diverses sources d'énergie (voir annexe 6).



OPPORTUNITÉS D'INNOVATION

1 Les moyens pour accélérer la transition énergétique

.....

Energies bas-carbone 22

Biocarburants et e-fuels 43

2 Le stockage de l'énergie: un élément clé pour permettre la transition

.....

Les différents moyens de stockage 44

Tableau comparatif des solutions de stockage 47



1. Les moyens pour accélérer la transition énergétique

Energies bas-carbone

Le Nucléaire

L'énergie nucléaire est l'énergie relâchée lors de la fusion ou de la fission de noyaux atomiques. L'usage de la fission nucléaire comme source d'énergie est une solution mature alors que la fusion est plutôt envisagée comme une solution de transition à moyen-long terme.

Utilisation actuelle de la fission nucléaire

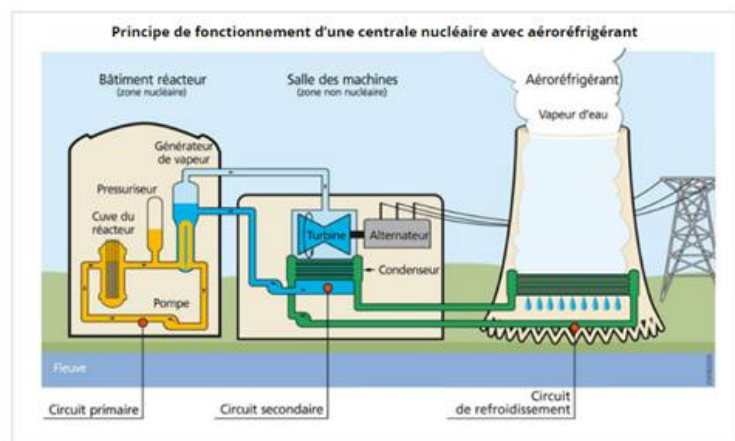
La fission nucléaire consiste en l'éclatement au contact de neutrons d'un noyau d'uranium instable. L'éclatement s'accompagne d'un dégagement de d'énergie thermique et d'autres neutrons qui viendront heurter d'autres noyaux, déclenchant ainsi une réaction en chaîne. La chaleur thermique va ensuite chauffer de l'eau jusqu'à ce qu'elle atteigne l'état de vapeur, ce qui lui permet d'entraîner une turbine liée à un alternateur et ainsi de produire l'électricité.

Chaque centrale est constituée de 3 circuits indépendants :

Le circuit (fermé) **primaire** dans lequel la chaleur est produite via la fission puis transférée vers les générateurs de vapeur,

Le circuit (fermé) **secondaire** par lequel la vapeur d'eau produite est apportée dans le générateur de vapeur jusqu'à la turbine puis l'eau sous forme liquide après son passage dans le condenseur est apportée jusqu'au circuit de refroidissement.

Source : IRSN



C'est au cours des années **1950** que la France, les Etats-Unis et l'Union Soviétique commencent à construire les premiers réacteurs fondés sur la fission nucléaire. On distingue aujourd'hui quatre générations de réacteurs, distinctes selon les besoins et enjeux de l'époque auxquels ils répondent, et non selon la technologie utilisée.

La première génération de réacteurs

**Entrés en service entre 1950 et 1960.
Utilisent de l'uranium naturel comme combustible.**

La deuxième génération

**Entrés en service dans les années 70, dans un contexte de compétitivité pour l'énergie nucléaire, d'indépendance énergétique suite au choc pétrolier et de tensions autour des énergies fossiles.
Utilisent principalement la technologie d'eau sous pression, même si quelques prototypes de réacteurs à neutrons rapides émergent. La plupart des réacteurs mondiaux actuels sont des réacteurs de deuxième génération.**

La troisième génération

Entrés en service à partir des années 90, sont en train de remplacer le parc nucléaire actuel. Ce sont des réacteurs dont la sûreté et la sécurité sont particulièrement élevées en réponse aux accidents de Tchernobyl et aux catastrophes comme les attentats du 11 septembre 2001. En France, ce sont les réacteurs EPR (European Pressurized Reactor de 1600 MW) qui entrent dans cette catégorie.

La quatrième génération

Actuellement en phase de conception et devraient être déployés dans la deuxième moitié du XXI^{ème} siècle. Ils utilisent les concepts de neutrons rapides et de fonctionnement à haute température permettant une optimisation de l'utilisation du combustible nucléaire. Ces réacteurs devront répondre à quatre critères: durabilité, sûreté, résistance à la prolifération nucléaire et compétitivité économique (exigences fixées par le Forum International Génération IV de 2001)



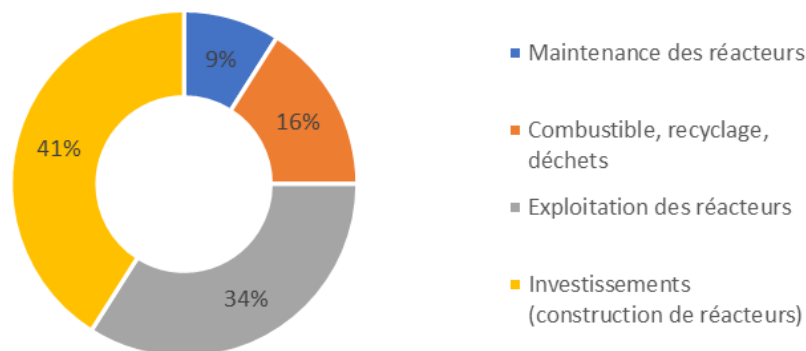
Concernant les réacteurs de quatrième génération, technologie la plus aboutie actuellement est celle des neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na), avec le développement de prototypes prouvant la faisabilité de la technologie. Parmi les autres technologies développées on peut trouver les réacteurs à sels fondus, les réacteurs à eau supercritique ou les réacteurs à très haute température.

Le **parc français** actuel comprend **56 réacteurs** sur **18 centrales** dont l'âge moyen est de **34 ans**. Parmi ces 56 réacteurs, 32 ont une puissance de 900 MWe (Méga Watt électrique), 20 une puissance de 1300 MWe et 4 une puissance de 1450 MWe. Ces réacteurs consomment 8000 tonnes d'uranium annuellement, importé principalement du Kazakhstan, du Niger, du Canada et de l'Australie, qui sont majoritairement des pays alliés de la France. Un EPR, de troisième génération est en construction à Flamanville dans la Manche.

Sa mise en service était initialement prévue en 2012. Elle est repoussée à 2023 suite à de multiples difficultés techniques. La loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte plafonne la puissance installée maximale à 63.2 GW. Ainsi, les anciens réacteurs doivent être arrêtés pour que de nouveaux soient construits.

La Cour des Comptes évalue le coût complet du parc nucléaire français à **61.6€/MWh**. Cette estimation prend en compte les dépenses de fonctionnement, de fin de vie des réacteurs, l'amortissement de l'investissement initial et la rémunération sur la totalité de la durée de vie du parc. La construction d'une centrale nucléaire s'élève à plusieurs milliards d'euros. Ex : L'EPR de Flamanville a atteint les **12 milliards d'euros**.

Composition du coût de production du parc nucléaire français



Source : Cour des comptes, vie-publique.fr

La production d'électricité par fission nucléaire pose trois problèmes majeurs :

(1) Le maintien en fonctionnement des réacteurs de deuxième génération mis en service depuis 40 ans.

C'est le cas de 11 réacteurs français. Il est théoriquement possible de maintenir ces réacteurs, cependant la sécurité devrait être accrue. L'Agence de Sûreté Nucléaire (ASN) a la charge d'autoriser ou non ce maintien.

(2) Le démantèlement des réacteurs ayant cessé d'être exploités.

*Les réacteurs de premières générations sont en cours de démantèlement et ce jusqu'à une date indéterminée. Initialement le démantèlement devait se terminer en **2036** mais de nombreuses difficultés ont repoussé cette date. C'est pourquoi la programmation pluriannuelle de l'énergie estime nécessaire le développement de la filière nucléaire du démantèlement en France. C'est à l'ASN de fixer les différentes étapes du démantèlement.*

(3) La saturation des sites de stockage des déchets radioactifs.

*La loi du **28 juin 2006** sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs définit ces déchets comme « des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée » (Article 5). L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra), créée en **1979** a établi dans son dernier Inventaire national des matières et des déchets radioactifs que la France hébergeait **1.64 millions** de m3 de déchets radioactifs fin 2018.*

Les **déchets radioactifs** sont classés selon leur activité et leur temps de décroissance radioactive, c'est-à-dire le temps nécessaire à diviser par 2 leur taux de radioactivité. L'Andra estime que **90%** du volume des déchets radioactifs français se compose de déchets à vie courte, mais que ce volume ne correspond qu'à **0.03%** de la radioactivité totale, tandis que les **10%** de volume restant représentent **99.9%** de la radioactivité totale (vie-publique, 2021). La gestion des déchets revient au producteur d'après le principe de pollueur-payeur. Ces déchets d'abord stockés au fond de l'océan - pratique maintenant interdite - sont désormais stockés en surface dans des centres de stockage comme celui de l'Aube. Néanmoins, les sites se remplissent et certains pourraient atteindre la saturation d'ici la fin de la décennie. De plus, les déchets à haute activité et à vie longue sont uniquement entreposés car il n'existe pas à l'heure actuelle de solution de stockage. La recherche est en cours, avec par exemple l'émergence du projet Cigéo consistant en l'enfouissement des déchets les plus dangereux dans des galeries à **500 mètres** de profondeur, avec une période de réversibilité de **100 ans** au cas où une meilleure solution serait trouvée dans l'intervalle. Ce projet suscite cependant de nombreuses controverses car il est difficile de prévoir les conséquences écologiques d'une telle solution, et notamment la stabilité du sol sur une très longue période. Un autre projet de traitement des déchets radioactifs est le CPA ou « **chirped pulsed amplification** » qui signifie amplification à dérive de fréquence (Tonson, 2018). C'est une technique par laser inventée par **Gérard Mourou** et **Donna Strickland** qui leur a valu le prix Nobel en 2018. Grâce à cette technique, le laser émet une impulsion ultracourte, ses impulsions spectrales vont être étirées, puis recomprimées sur une durée si brève qu'elle permet d'atteindre une puissance de l'ordre du petawatt (10^{15} watts), et ce sans abimer le laser. Cette solution est déjà utilisée pour la chirurgie ophtalmique, mais Gérard Mourou envisage de l'utiliser dans le nettoyage de débris spatiaux ou dans la transmutation d'éléments radioactifs dans les déchets à haute activité et à vie longue. Cette transmutation permettrait de convertir ces déchets en déchets radioactifs à vie courte (quelques centaines d'années) (Andra, 2019).

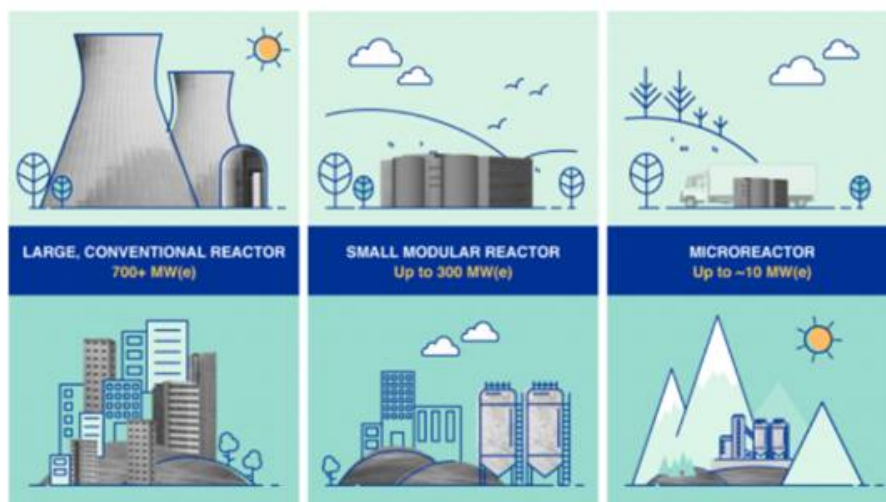


Utilisation à moyen terme de la fission nucléaire : Les technologies émergentes

A moyen-terme, deux nouveaux types de réacteurs ont été développés : Les **Small Modular Reactors** (SMR) et les MicroReactors (MR).

Les Small Modular Reactors sont des réacteurs de taille et de puissance plus faible que les réacteurs conventionnels. Ceux de la catégorie Small sont d'une puissance d'environ 300 MWe contre 10MWe pour la catégorie micro (Liou, 2021). Ils peuvent être assemblés dans une

usine et transportés sur le site désiré en tant qu'unité. Il y a moins de danger étant donné la puissance plus faible et la pression d'opération plus basse. De plus ils n'ont besoin d'être alimentés que tous les **3 à 7 ans** contre 1 à 2 ans pour un réacteur conventionnel. Ces SMR sont en développement partout dans le monde et la France n'est pas en reste. Ce concept pourrait permettre d'alimenter des bases militaires, en particulier si le combustible pouvait être recyclé. Certains microréacteurs utiliseraient d'ailleurs de l'uranium « low-enriched » ce qui empêcherait de transformer ces réacteurs en armes nucléaires.



Un SMR est actuellement co-réalisé par EDF, le CEA, TechnicAtome et Naval Group. Il possède une puissance de 340 MWe, et est constitué de deux réacteurs REP (réacteur à eau sous pression). La commercialisation est prévue pour la décennie 2030 (CEA, 2021).

Les micro-réacteurs sont des réacteurs particulièrement récents, de quatrième génération. Le réacteur **HTR Jimmy** et le réacteur à sels fondus Naarea sont des exemples de projets prometteurs, et développés par des industriels français.

Le réacteur Jimmy est un générateur thermique de type HTR (**High Temperature Reactor**), destiné à l'industrie. Il fournit jusqu'à **10 MWth** (thermiques) et une température de 600°C, le tout dans une enceinte de 7m * 10m * 14m. Il possède des niveaux de sûreté et sécurité élevés car il ne nécessite pas un refroidissement actif lors de l'arrêt du réacteur. Une augmentation trop importante de la température diminue l'activité de fission jusqu'à son arrêt et les gaines entourant le combustible sont en céramique, quasiment indestructibles, il n'y a donc pas de risque de relâchement des produits de fission. Le générateur ne stocke pas de combustible hors cuve sur place et ne gère aucune partie électrogène qui pourrait constituer un facteur de risque supplémentaire. Il a été conçu pour résister à tout acte de malveillance et est approuvé par la Direction de Sûreté Nucléaire. Jimmy crée très peu de déchets (200 réacteurs Jimmy créent 1% des déchets produits en France), il peut aussi utiliser comme combustible les déchets recyclés de centrales. Une grande majorité des matériaux peut même être réutilisée de générateur en générateur. La commercialisation devrait se faire à partir de 2025. Cette technologie pourra être couplée à d'autres systèmes émergents.

Le réacteur **Naarea** rentre dans la catégorie des «**Extra Small Advanced Modular Reactor (XSAMR)**» à neutrons rapides et sels fondus, un micro-réacteur de quatrième génération. Ce réacteur utilise comme combustible des matières recyclées issues de combustibles usagés, et est réalisé grâce à des matériaux innovants et des méthodologies constructives disruptives. Il possède par ailleurs **une autonomie de 5 à 7 ans** sans raccordement au réseau. Naarea a développé un produit qui se veut simple de fonctionnement et au profil de sécurité le plus élevé possible. Cette technologie pourrait être un complément aux énergies solaires et éoliennes. Il a pour ambition d'adresser les besoins des consommateurs d'énergie des industriels et des collectivités, pour leur permettre d'assurer une souveraineté et une autonomie énergétique.

Le projet **MYRRHA** est un projet de recherche porté par le SCK CEN, un de plus grands centres de recherche belges. Le centre travaille sur plusieurs thématiques liées au nucléaire : La production d'énergie, le médical, la sûreté, la gestion des déchets etc. Le projet MYRRHA est une infrastructure de recherche polyvalente. Elle est constituée d'un réacteur de recherche piloté par un accélérateur de particules, premier réacteur au monde de ce type. Ce réacteur utilise un **réfrigérant plomb-bismuth**, caractéristiques des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération. Cette infrastructure de recherche a deux buts principaux : Etudier la transmutation (un procédé qui permettrait de réduire la durée de vie des déchets radioactifs, de 300 000 ans à 300 ans) et effectuer des recherches sur les matériaux actuels et l'usage de nouveaux matériaux dans les futurs réacteurs à fusion nucléaire. Le SCK CEN participe ainsi au projet international IL TROVATORE qui étudie de nouveaux matériaux enveloppant les tubes d'uranium, pour augmenter la sûreté. Ces deux projets ont comme point commun l'ambition de réduire les déchets radioactifs, fléau de la fission nucléaire. Cette énergie engendre également de nombreuses émissions de CO2 indirectes, que ce soit par la construction de réacteurs ou le transport de combustibles. Néanmoins, la recherche progresse sur ces sujets, et la fission nucléaire paraît une bonne solution à moyen terme pour une transition vers des énergies renouvelables.

Utilisation à moyen-long terme de la fusion nucléaire

La **fusion nucléaire** correspond à la fusion entre deux noyaux de deux atomes. Lorsque ces deux noyaux fusionnent, ils perdent une infime partie de leur masse, mais une grande quantité d'énergie (d'après la formule d'Einstein $E=\Delta mc^2$). Cette réaction se produit constamment au cœur du Soleil et des étoiles. La principale difficulté pour reproduire de telles réactions sur Terre est la température : **il faut plusieurs millions de degrés et des vitesses de particules extrêmement élevées pour pouvoir fusionner des noyaux (GIEC, 2013).**

Le 13 décembre 2022, le Laboratoire National Lawrence Livermore (Californie) a annoncé avoir réussi pour la première fois une expérience de fusion qui a produit plus d'énergie que celle fournie pour la déclencher.

ITER (chemin en latin) est un projet du centre de recherche atomique de Cadarache dans les Bouches-du-Rhône. Débuté il y a 35 ans et regroupant 35 pays, les chercheurs œuvrent dans l'objectif de construire le plus grand tokamak mondial. La réussite du projet prouverait qu'il est possible d'utiliser la fusion pour produire de l'électricité. Un tokamak est une machine expérimentale servant à exploiter l'énergie de la fusion. Il est constitué d'une chambre à vide en forme d'anneau dans laquelle l'hydrogène passe à l'état de plasma, ce qui permet aux noyaux de fusionner et de générer de l'énergie absorbée sous forme de chaleur par les parois. Cette chaleur sert ensuite, tout comme pour la fission, à produire de la vapeur entraînant une turbine liée à un alternateur produisant l'électricité.

Les 5 grands objectifs d'ITER sont :

- **Produire 500 MW de puissance de fusion avec une entrée de 50 MW.** ITER n'a pas pour vocation de produire de l'électricité, la machine ne fonctionnant pas de manière continue, mais uniquement de prouver qu'il est possible de récolter l'énergie de fusion pour la convertir en électricité.
- « **Démontrer le fonctionnement intégré des technologies d'une centrale de fusion électrogène** » : ITER permettra aux scientifiques de tester les technologies comme le chauffage ou le contrôle pour pouvoir les appliquer à de futures centrales de fusion électrogènes.
- « **Réaliser un plasma deutérium-tritium auto-entretenu** » : le deutérium et le tritium sont deux isotopes de l'hydrogène.
- « **Expérimenter la production de tritium** », le tritium n'étant pas en quantité suffisante sur Terre pour répondre aux besoins de futures centrales de fusion électrogènes.
- « **Démontrer la sûreté d'un dispositif de fusion** »

Le calendrier du projet prévoit un premier plasma pour **décembre 2022** et des opérations en deutérium-tritium en **2035**. La production massive d'électricité pour la fusion ne sera ainsi disponible que dans plusieurs décennies. ITER pourrait permettre sur du long terme d'apporter de nombreuses connaissances et technologies sur la fusion, qui pourraient ensuite être adaptées au domaine militaire.

Helion Energy est une start-up américaine développant une technologie pour créer de l'électricité à partir de la fusion. Le réacteur est alimenté par du deutérium (une forme d'hydrogène) et de l'hélium-3. Grâce à des aimants, les deux éléments à l'état de plasma se rencontrent au centre d'un accélérateur plasma. Lors de la collision, ils sont comprimés par un champ magnétique, jusqu'à atteindre **100 millions °C**. Les atomes fusionnent alors en libérant de l'énergie, qui modifie le champ magnétique et génère de l'électricité. Par rapport à d'autres entités travaillant sur la fusion, Helion Energy utilise un système de fusion pulsé sans allumage « **pulsed non-ignition fusion system** ». Cela permet d'avoir un accélérateur plus petit que les accélérateurs utilisant d'autres approches et de réguler le flux d'électricité produite. L'hélium-3 est très rare mais Helion Energy produit le sien en fusionnant du deutérium dans l'accélérateur plasma. Le deutérium est quant à lui particulièrement accessible car il se trouve dans tous les types d'eau. L'hélium 3 est particulièrement énergétique. Cela permet de proposer un système plus petit. L'utilisation du changement de champ magnétique pour générer de l'électricité permet de générer l'électricité sans intermédiaire tel que des turbines. Ce système permet aussi d'éviter les réactions en chaîne et donc limite le danger, l'accélérateur pouvant être arrêté à tout instant. Depuis **2020**, le 6e prototype appelé Trenta est en phase de test. Aucune date de commercialisation n'a été annoncée mais un 7ème prototype, Polaris, devrait produire de l'électricité d'ici **2024**, en tant que démonstrateur. La start-up estime que le coût devrait être l'un des plus bas parmi les différentes sources d'énergie.



À la suite de la catastrophe de Tchernobyl, les pays membre de l'**Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA)** ont ratifié en **1994** la Convention sur la Sûreté Nucléaire, qui est entrée en vigueur en 1996. Après la catastrophe de **Fukushima** de **2011**, ces mêmes Etats membres se sont réunis à nouveau pour renforcer la Convention, sans parvenir à un accord. En France, c'est la loi du **13 juin** relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi TSN) qui régit le secteur nucléaire. Elle est fondée sur le principe de précaution. Cette loi entraîne la création de l'**Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)** ainsi que le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire.



L'ASN est chargée de contrôler les activités nucléaires ainsi que la radioprotection, et ce au nom de l'Etat en tant qu'autorité administrative indépendante. Le gouvernement donne les autorisations de création et de démantèlement de centrales et l'ASN se charge du reste. Il existe également l'**Institut de Radioprotection et de Sûreté nucléaire (IRSN)**, un organisme public effectuant des missions de recherche et d'expertise des risques nucléaires et radiologiques. Enfin il existe un Délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les installations et activités intéressant la Défense dépendant du ministère des armées et de l'industrie dont le but est de contrôler la sûreté nucléaire et la radioprotection des installations nucléaires secrètes (GIEC, 2013).

L'Hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers. Il constitue le Soleil et les étoiles. On le trouve sur Terre comme l'un des constituants de l'eau, des hydrocarbures ou de la biomasse. Lorsqu'il est séparé des autres constituants de ces éléments il devient du dihydrogène H_2 (appelé couramment hydrogène). Les liaisons cassées dans le processus de séparation libèrent une quantité importante d'énergie (1 kg de H_2 libère quatre fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence). Il est nécessaire de préciser que l'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais un vecteur énergétique car il doit être produit puis stocké avant d'être utilisé. Cette caractéristique lui procure un avantage par rapport aux autres énergies (e.g solaire et éolien). Le stockage et transport de l'énergie permet de pallier aux manques et de mettre en place une meilleure gestion.

L'hydrogène (non décarboné) est utilisé depuis plusieurs décennies pour l'industrie. Son usage est donc bien maîtrisé, l'industrie est habituée aux risques et à son maniement, et ce pour de grandes quantités.

Les différents moyens de production

L'hydrogène peut être produit de plusieurs façons :

Par vaporeformage (hydrogène gris) :

95% du dihydrogène est produit par vaporeformages de combustibles fossiles, principalement de gaz naturel composé essentiellement de méthane (CH_4). Le mélange monoxyde de carbone dihydrogène obtenu lors du vaporeformage est appelé gaz de synthèse. Le coût de production par vaporeformage est de **1.5 à 2.5€/kg** pour des industriels à usage intensif comme les raffineries, et entre **10 et 20 €/kg** pour des industriels diffus devant acheminer l'hydrogène.

Par électrolyse :

L'électrolyse est un procédé d'oxydo-réduction de l'eau avec un électrolyseur composé d'une membrane (électrolyte), d'une anode et d'une cathode. A l'anode, il y a une réaction d'oxydation de l'eau qui donne du dioxygène (O_2) et des protons d'hydrogène (H^+). La membrane empêche les électrons de traverser, et non les protons qui traversent la membrane jusqu'à la cathode où ils rencontrent les électrons apportés par du courant électrique et se convertissent en H_2 lors d'une réaction de réduction. Il faut un litre d'eau pour produire 100 grammes de dihydrogène. Si le courant électrique provient d'énergies renouvelables alors la production d'hydrogène est décarbonée et dite « verte » ou « propre ». La plupart des électrolyseurs actuels nécessitent une eau pure pour fonctionner, ce qui peut représenter une contrainte importante. Différents types d'électrolyses existent, qui varient non dans le principe mais dans les conditions de pression et de température et les matériaux utilisés. On en recense trois majeures : l'électrolyse alcaline avec une électrolyte constituée d'une solution d'hydroxyde de potassium, la Proton Exchange Membrane ou Membrane Echangeuse de Protons (PEM) et l'électrolyse à haute température. Le coût de production par électrolyse actuel est de 4 à 6€/kg pour 4 000 à 5 000 heures d'utilisation par an par rapport au coût de l'électricité d'environ 50€/MWh. Il y a donc un potentiel pour le marché de l'électrolyse. De plus, une baisse des coûts est à prévoir. D'ici 2028, le prix au kg pourrait atteindre 2 à 3€ (prix actuel du kg de dihydrogène pour les industriels). Enfin, le coût de production provient majoritairement de l'achat de l'électricité permettant de faire fonctionner l'électrolyse et du coût d'investissement, ce qui en font les deux majeurs leviers d'optimisation.

L'entreprise sHYp a créé un électrolyseur fonctionnant à l'eau salée et permettant de produire de l'hydrogène vert. Un avantage de cette technologie est qu'en plus de produire de l'hydrogène, l'électrolyseur peut capturer le dioxyde de carbone de l'eau de mer et produire des sous-produits pouvant être revendus. Ainsi, le coût de production est capable d'atteindre ceux de l'hydrogène gris. L'entreprise en est au stade de commercialisation de démonstrateurs pilotes.



Par Biomasse :

La gazéification à la vapeur d'eau de biomasse génère un gaz de synthèse constitué principalement de monoxyde de carbone et de dihydrogène, qui est ensuite purifié pour éliminer les polluants. Le bilan sur l'effet de serre est quasiment neutre car la combustion du monoxyde de carbone dégage environ autant de CO₂ que le processus naturel de dégradation de la biomasse sans gazéification.

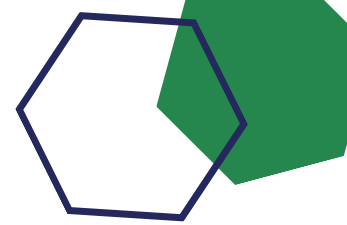


La start-up **Sakowin** s'est lancée en 2017 dans la production d'H₂ sans carbone. La petite entreprise innovante utilise une technologie (protégée par 3 brevets) de « microwave plasma », plasmalyse qui consiste à la décomposition du biométhane en dihydrogène gazeux et carbone solide ne produisant pas d'émissions de CO₂. Sakowin vend des stations de production destinées à de nombreux domaines. « Notre solution a recours à cette énergie primaire, renouvelable et inépuisable, que nous transformons sans oxygène en carburant neutre en émissions carbone » a expliqué son président fondateur, Gérard Gatt dans un entretien aux Echos. La start-up a réussi à lever **9 millions** pour son réacteur d'hydrogène. Une autre initiative, l'entreprise Athéna Recherche et Innovation se concentre sur la production de biohydrogène à partir des déchets et eaux usées de l'industrie agroalimentaire.

Gisements naturels :

Le long des chaînes volcaniques sous-marines existent des gisements connus mais inatteignables, les chercheurs se penchent sur des couches terrestres qui dégazent et accumulent ainsi du H₂.

L'entreprise française 45-8 Energy qui est la première entreprise dont l'activité est « l'exploration et la production éco-responsable en Europe d'hélium et de ses ressources associées telles que l'hydrogène naturel ». L'hélium pourrait d'ailleurs alimenter la centrale de fusion électrogène développée par Helion Energy et mentionnée dans la partie Nucléaire. L'avantage de cette approche est qu'elle est décarbonée et qu'elle permettrait d'exploiter des gisements où l'hydrogène est minoritaire et où son exploitation seule serait d'ordinaire non rentable.



Les différents moyens de stockage de l'hydrogène

A température ambiante et pression atmosphérique, le dihydrogène est extrêmement volatile du fait de sa très petite taille. Il existe plusieurs technologies de stockage selon les besoins : pour des installations stationnaires où le volume à stocker est important, le stockage se fait sous forme gazeuse à **75 bars** (pression considérée relativement basse). Ce stockage est peu coûteux et parfaitement maîtrisé mais il nécessite un grand volume disponible. Pour de la haute technologie comme la propulsion spatiale, l'hydrogène est stocké liquide à basse pression (**-253°C, 10 bars**). L'inconvénient majeur est qu'il est impossible d'empêcher complètement les fuites, même pour les stockages les plus isolés car ils laissent passer un peu de chaleur donc le dihydrogène se vaporise. Un compromis de compacité sans atteindre de très basses températures est le stockage par gaz sous haute pression (**700 bars**). Les avantages sont l'imperméabilité, la résistance aux hautes pressions et la résistance aux chocs grâce à l'architecture et aux matériaux utilisés.

La recherche s'intéresse également aux matériaux hydrures qui absorbent et désorbent l'hydrogène et permettraient un stockage sous forme solide. Ce serait le moyen le plus efficace pour avoir une forte densité volumique d'énergie. Cependant l'inconvénient majeur est le poids du matériau hydrure.

Un des projets développés selon ce concept est le projet militaire Morphy. Développé avec Safran et Mahytec, Morphy consiste en un système de stockage d'hydrogène à combiner aux piles à combustible fonctionnant à l'hydrogène pour alimenter le fantassin en énergie électrique. Le stockage se fait ainsi sous forme solide avec un hydrure métallique qui est adapté aux conditions de température et de pression. Le système est basse pression ce qui limite le danger.

D'autres axes de recherche pour le stockage sont la détection de fuites et le développement de matériaux pouvant résister aux conditions extrêmes dans une optique d'optimisation de la taille des systèmes de stockage.



Le transport et la distribution de l'hydrogène

Le mode de transport de l'hydrogène est choisi en fonction de son état, gazeux ou liquide.

- A l'**état gazeux**, le transport se fait majoritairement par pipelines. Les coûts de constructions de telles infrastructures étant très élevés, c'est le réseau de gaz naturel existant qui est utilisé, en mélangeant le gaz naturel et l'hydrogène, ce qui nécessite peu de modifications techniques. Les Etats-Unis entre autres utilisent aussi des « tube trailers », des camions transportant l'hydrogène sous forme gazeuse à **250 bars** réglementaires avec des exceptions à **500 bars**, ce qui nécessite de comprimer l'hydrogène en amont. Ces camions, actuellement utilisés pour transporter du gaz naturel dans d'autres pays, transportent chacun entre **560 et 900kg d'hydrogène**.
- A l'**état liquide** le transport se fait dans des camions cryogénisés extrêmement isolés pour des trajets de longue distance. Les principaux inconvénients sont le risque d'ébullition et l'énergie nécessaire pour liquéfier l'hydrogène.

Pour le domaine militaire, Hensoldt a développé un véhicule de transport de volumes importants d'hydrogène à une pression de 500 bars voire plus, qui permettrait d'éviter la compression sur place. Le véhicule est une sorte de remorque avec plusieurs cylindres de stockage d'hydrogène reliés entre eux par des tubes et qui permet d'être distribué sans perdre la pression. Le véhicule assure ainsi le transport et la distribution au point de livraison. La solution est déployée et fait son apparition sur le marché.



L'hydrogène peut être transporté via d'autres vecteurs, par la formation de composés organiques liquides de l'hydrogène (Liquid Organic Hydrogen Compound, LOHC).

En ce qui concerne **la distribution**, notamment pour des véhicules particuliers, des stations sont en cours de développement. Le problème majeur de développement de ces stations est le manque de moyens. Pour construire des stations il faut des clients, et les flottes de véhicules ne peuvent se développer tant qu'il n'y aura pas suffisamment de stations de distribution. De nombreuses entreprises se lancent cependant sur ce marché qui apparaît prometteur.

C'est le cas d'Ergosup, dont la technologie repose sur l'électrochimie du zinc et une capacité de découpler dans le temps les dégagements de dioxygène et dihydrogène gazeux, ce qui lui a valu d'être lauréat du concours mondial de l'innovation. Cette technologie est ensuite utilisée dans des stations de distribution d'hydrogène, que ce soient pour des besoins stationnaires ou pour le domaine de la mobilité. Ces stations transportables sont constituées d'un système de production fonctionnant à l'énergie solaire, de stockage, de compression et de restitution. Un autre avantage de la technologie développée par Ergosup est le stockage .

En effet, c'est le réacteur qui sert de stockage d'hydrogène en le conservant sous forme ionique liquide à température ambiante (ce qui résout de nombreuses contraintes, notamment vis-à-vis de la réglementation de type Seveso). Les stations sont souvent pensées pour résister à des conditions extrêmes, avoir une durée de vie d'une quinzaine d'années, utilisent des énergies renouvelables (le plus souvent solaire) et permettent d'atteindre des stations de puissance du kW au MW.



Utilisation à court-moyen terme de l'hydrogène

Dans l'industrie, l'hydrogène est utilisé pour la sidérurgie, la verrerie, etc. ou dans le domaine de la chimie pour produire de l'ammoniac par exemple. Son utilisation en tant que chaleur est en voie de développement.

Pour créer de la chaleur, l'hydrogène est mélangé au méthane dans le réseau gazier.

C'est le cas du projet britannique Hy4Heat. Ce programme teste l'utilisation de l'hydrogène pour remplacer le gaz naturel dans les bâtiments résidentiels et commerciaux. Grâce à cela, un quartier britannique devrait dès 2023 utiliser l'hydrogène pour se chauffer et cuisiner.

Le dihydrogène permet aussi la méthanation, c'est-à-dire la mise en réaction de dihydrogène et de dioxyde de carbone pour donner du méthane et de l'eau, méthane pouvant ensuite être distribué dans le réseau de gaz. On appelle ce processus le power-to-gas.

Le projet Jupiter 1000 à Fos-sur-Mer expérimente cette technique : le dihydrogène est produit par électrolyse de l'eau et le dioxyde de carbone est récupéré d'une aciérie à proximité. Le CEA utilise ce processus pour la production de biocarburants et électro carburants (en anglais e-fuels ou powerfuels), en produisant du méthane ou du méthanol mais aussi des composants plus complexes comme le gasoil ou le kérosène.

L'utilisation la plus prometteuse de l'hydrogène est la production d'électricité, que ce soit en tant que carburant de véhicules, pour un réseau électrique ou alimenter des appareils. Différents types de piles à combustible ont été développés, ce sont des piles générant de l'électricité grâce à une réaction chimique d'oxydo-réduction. La plupart fonctionnent avec du dihydrogène, même si ce n'est pas une généralité (annexe 7 et 8).

Symbio, détenue par Faurecia et Michelin, commercialise des piles à hydrogène (« StackPacks » de la gamme H2Motive) pour des véhicules légers à lourds dans le domaine civil.

Le CEA développe l'impression des composants pour une pile à combustible. Cela permettrait de réduire la taille des motifs pour améliorer la densité jusqu'à un idéal de 6kW/L. Par ailleurs, cette technologie garantirait une autonomie et une souveraineté technologique à la France.

Acteurs publics et privés sont mobilisés pour favoriser le développement des technologies hydrogène nécessaires pour accélérer la transition énergétique.

Parmi les acteurs publics on trouve les gouvernements qui subventionnent, investissent et lancent des appels à projets.

- En France, le plan « Ecosystèmes territoriaux hydrogène » pour le développement de l'hydrogène décarboné a été lancé le 8 septembre 2020. L'Etat français a également décidé d'investir 7 milliards d'euros entre 2021 et 2030 en faveur du développement de l'hydrogène décarboné, avec comme priorité la décarbonation de l'industrie dans l'optique du zéro carbone d'ici 2050. L'objectif est de favoriser le développement de mobilités lourdes fonctionnant à l'hydrogène, soutenir la recherche et les formations.
- Aux Etats-Unis, le gouvernement a lancé l'initiative H2@Scale et le programme associé Hydrogen Energy Earthshot dédié à la réduction du coût de l'hydrogène vert de 80% jusqu'à \$1 pour 1 kg en une décennie.
- L'UE joue un rôle majeur dans le développement de l'hydrogène grâce au financement des projets Hydrogen Valleys. Ce sont des projets de développement des technologies d'hydrogène et de piles à combustible ainsi que l'écosystème associé (participation à l'élaboration de la réglementation, communication de l'information...). Voir annexes 9, 10 et 11.

En ce qui concerne les acteurs privés, ils jouent un rôle crucial dans le développement de l'hydrogène en finançant la majeure partie de la **R&D**. Le **MEDEF** et France Hydrogène ont récemment créé la *Task Force Hydrogène* pour promouvoir les entreprises françaises de l'hydrogène à l'international, mettre en relation les entreprises et accroître l'influence du secteur de l'hydrogène français sur la scène mondiale. La Task Force a récemment créé *l'index H40*, dont le but est de rassembler et valoriser **40 start-ups** et **small caps** (entreprises à faible capitalisation) françaises sur les marchés internationaux. Les sept premiers lauréats de l'index sont :

- **45-8 Energy** : Mentionnée précédemment dans l'exploitation de gisements.
- **Haffner Energy** : Développeur du système breveté « Hynoca » qui produit de l'hydrogène à partir de la biomasse via la thermolyse, une technologie plus efficace que la gazéification. Les stations sont modulables, évolutives, faciles à installer et peuvent produire de 250 à 1000 kg par jour d'hydrogène. A court terme, le coût devrait être inférieur aux 8 à 10 €/kg des procédés plus conventionnels comme l'électrolyse décentralisée ou le reformage avec transport, mais à long terme, avec la diminution de la valeur marchande des intrants la production coûtera encore moins cher. Ce système produit également du gaz de synthèse qui peut être vendu, ce qui permet d'amortir l'investissement rapidement et ne pas être limité par le développement lent du système hydrogène en France.
- **Atawey** : Développeur d'une station de production et de distribution d'hydrogène vert. Cette station est autonome et sûre car elle utilise l'électrolyse de l'eau en supprimant les produits corrosifs habituels. Ainsi, la maintenance est simplifiée, sécurisée et les composants possèdent une durée de vie plus importante (15 ans). Il est possible de charger entre 1 et 20 véhicules à hydrogène par jour à la pression voulue (300, 350 ou 700 bars) et des véhicules électriques à batterie. Un avantage majeur est sa petite taille, une place de parking, ce qui la rend facilement transportable et déployable.
- **FillnDriv** : Développeur d'une station de distribution d'hydrogène connectée, accompagnée d'une application mobile et d'un webportail pour les particuliers.
- **Bulane** : Développeur de systèmes de flamme hydrogène/combustion oxy-hydrogène. Cela permet de générer un combustible propre.

- **H2SYS** : Spécialiste des piles à combustible, produit des groupes électrogènes à hydrogène de 1 à 8 kVA en portatif, 50 à 130 en stationnaire, des piles à hydrogène de 0.5 à 3kW. Son innovation la plus intéressante pour le secteur de la défense est « Mothys », un banc d'essai didactique avec pile à combustible, batterie et convertisseurs. Ce système permet de faire des formations sur les systèmes hybrides et à hydrogène, ce qui pourrait se révéler un atout d'accroissement des compétences des techniciens.
- **Helion Hydrogen Power, filiale d'Alstom** : Développeur de piles à combustible à membrane échangeuse de protons. Ces piles sont en graphite. Elles sont ensuite incorporées dans des stations modulaires, de puissance importante (plusieurs centaines de kW) et peuvent être converties en système de chaleur et de refroidissement.

Les laboratoires sont des innovateurs clés dans le développement des technologies hydrogène. Ils agissent sur les solutions les moins matures technologiquement (de 1 à 4 sur le système de mesure de maturité technologique TRL). Le **programme PEPR-H2**, Programme et Equipement Prioritaire de Recherche sur l'hydrogène décarboné, est un exemple d'une initiative prometteuse initiée par CEA et le CNRS. Le programme, qui durera entre 5 et 6 ans, se compose de sept projets de recherche sur les matériaux pour améliorer les capacités des futures piles à combustible.

Si les initiatives françaises de la filière hydrogène sont ambitieuses, de nouveaux projets industriels ou de mobilité de grande puissance (centaine de Mégawatts) apparaissent sur les marchés étrangers avec les avantages d'un coût de l'électricité bas et d'un soutien de leurs pouvoirs publics. La France a donc deux défis majeurs à relever : la massification des marchés et l'augmentation de son industrialisation pour répondre à la demande.

Pour rassembler et créer des synergies entre les acteurs publics et privés, en correspondance avec la stratégie nationale, **Barbara Pompili**, ministre de la Transition écologique, **Bruno Le Maire**, ministre de l'Économie, des Finances et de la Relance, **Frédérique Vidal**, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, et **Agnès Pannier-Runacher**, ministre déléguée en charge de l'Industrie ont décidé de créer le Conseil National de l'Hydrogène début 2021, avec à sa tête **Benoît Potier** et **Patrick Koller**, respectivement PDG d'Air Liquide et DG de Faurecia, deux des plus grandes entreprises françaises du domaine de l'hydrogène. Au niveau international, le Hydrogen Council produit régulièrement des rapports sur l'état global du développement de la filière hydrogène dans le monde.

Par ailleurs, les technologies développées doivent être conformes au cadre réglementaire international, européen (*annexe 13*) et national (*annexe 12*). A l'échelle internationale, un travail de standardisation est en cours dans le but d'encadrer les normes de sécurité et de performance des systèmes. Le comité **ISO/TC 197** travaille actuellement à la normalisation des systèmes et dispositifs de production, stockage, transport et utilisation de l'hydrogène. Cela dit, pour que la France et l'Europe soit à terrain égal (« level playing field ») avec la concurrence mondiale, et que la filière hydrogène ait un développement compétitif, il est nécessaire de renforcer la réglementation sur les usages et les normes technologiques. L'un des points nécessaires de la réglementation de l'hydrogène est la garantie d'origine dont le but est d'assurer une traçabilité de l'origine et des attributs environnementaux de l'hydrogène. Ainsi, un système de garanties d'origine à l'échelle européenne est en cours de création, et permettra qu'un complément de rémunération adapté selon les modes de fabrication de l'hydrogène bas-carbone soit institué. C'est pourquoi la plateforme **CertifHy** a été développée, avec l'appui des institutions européennes. Cette plateforme propose un système pilote de garanties d'origine de l'hydrogène, avec plus de **75 000 garanties** d'origine déjà émises. Il s'agit d'un premier pas vers un plus grand système de traçabilité ainsi que vers l'instauration de labels et terminologies garantissant la contribution de l'hydrogène à la décarbonation des usages, en fonction de son origine et de son cycle de vie.

Le solaire

L'énergie solaire se décompose en deux applications majeures : la production d'électricité et la production d'énergie thermique. Récemment des systèmes ont été testés, en-cours de développement, pour permettre une hybridation des deux. La production d'énergie thermique est majoritairement utilisée par des clients particuliers et commence à s'ouvrir aux clients industriels. *Cette partie ne sera donc pas traitée dans ce livre blanc.*

La production d'électricité à base d'énergie solaire

Pour créer de l'électricité à partir d'énergie solaire, deux procédés technologiques sont utilisés : le recours aux panneaux photovoltaïques et le recours à un procédé thermodynamique.

Les panneaux photovoltaïques sont composés de cellules qui transforment l'énergie solaire en courant électrique continu. Ce courant traverse ensuite un onduleur permettant de le rendre exploitable. La durée de vie d'un panneau photovoltaïque est d'environ 25 ans et son rendement varie entre 10 et 20% selon les technologies. En termes de comparaison, le rendement d'une centrale nucléaire est de 33% environ pour un réacteur 2e génération, 35% pour un de 3e génération ; celui d'une centrale hydraulique est d'environ 80% ou encore 55% pour une pile à combustible fonctionnant au dihydrogène. Des procédés technologiques sont actuellement en cours de développement pour tenter d'améliorer le rendement des panneaux photovoltaïques. Récemment, le recours à des cellules solaires à pigments photosensibles (DSSC) est envisagé. Ces cellules sont plus sensibles à la luminosité et nécessitent moins d'ensoleillement pour fonctionner. Initialement développées dans les années 80, elles ont été écartées au profit des technologies solaires en silicium traditionnelles en raison de leur faible densité de puissance. Ainsi, le développement de technologies permettant l'usage des DSSC en est toujours au stade d'innovation.

Avec l'ambition d'atteindre la neutralité carbone en Europe à horizon 2050, des initiatives innovantes voient le jour.



La start-up **Suisse Sun-Ways** propose d'utiliser les **260 000** kilomètres de voies ferrées qui tapissent l'Europe pour créer de l'énergie solaire. La solution développée par l'entreprise permet l'installation de centrales solaires amovibles entre les rails de chemins de fer qui ne gêneraient pas la circulation des trains. Les panneaux seraient déposés et retirés automatiquement par train en quelques heures, via un système breveté par la start-up.



Le solaire thermodynamique utilise l'énergie thermique fournie par le soleil pour chauffer un fluide caloporteur (entre **200°C** et **2500°C**) entraînant une turbine. Plusieurs technologies existent mais elles nécessitent toutes un ensoleillement direct important (supérieur à 1900kWh/m2/an).

La **PME H2P** a développé **Solthair**, une centrale thermique solaire de **10 kW** déployable en opérations extérieures (**OPEX**). Le dispositif repose sur un système breveté qui convertit la chaleur en énergie mécanique pouvant alors alimenter un alternateur. La chaleur est fournie par l'air chauffé par une centrale solaire transportable, composée d'une parabole de 30m2 de miroirs qui va concentrer la lumière sur une surface de type feuille A4. Une station possède une puissance d'environ 10 kW, elle nécessite peu de maintenance et son encombrement au sol est faible.

“

« C'est le principe d'une cocotte-minute : nous chauffons l'air et le faisons monter en pression ».

”

Frédéric Thévenod
PDG de H2P



Utilisation de l'énergie solaire : Innovations et axes de développement

L'un des axes majeurs pour le déploiement et l'utilisation de l'énergie solaire est celui de la portabilité des centrales solaires.

Akuo, une start-up française a misé sur la portabilité de sa solution « **Solar Gem** ». La centrale solaire transportable Solar Gem et son conteneur de stockage d'énergie Storage Gem peuvent être installés sur quasiment tout type de terrain. Il est possible de connecter plusieurs unités entre elles, sans limiter le nombre de connexions pour atteindre une puissance désirée.



Le système est robuste et capable de résister à des conditions extrêmes (testé sous des conditions de cyclone). Solar Gem est compatible avec n'importe quel EMS (Energy Management System) et type de stockage. Le Storage GEM quant à lui est un conteneur de stockage d'énergie modulaire allant de **200 à 800kWh** et de **500 à 1500 kWh**.

Certaines entreprises développent également du solaire « offshore ». Sea 6 Energy a conçu les Dweeps, des centrales solaires flottantes, conçues pour résister aux conditions marines extrêmes.

Le recyclage des panneaux en fin de vie est également étudié. Selon l'**ADEME**, **85%** des matériaux composant les systèmes photovoltaïques sont recyclables (données de 2018) et ce taux devrait continuer d'augmenter.

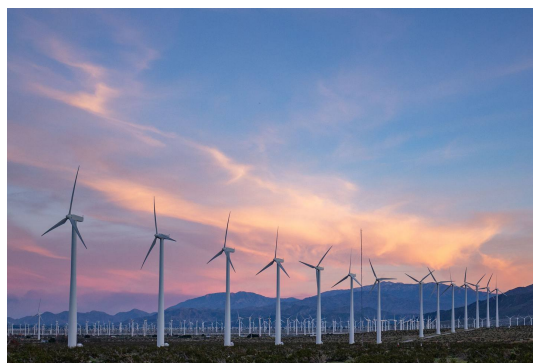
Le recours à l'énergie solaire, bien que renouvelable, possède de nombreuses limites : son rendement encore faible nécessitant de grandes superficies d'exposition au soleil, son intermittence qui pourrait être notamment palliée par le développement de stockage à l'hydrogène ou encore le fait que les panneaux soient actuellement produits en Chine. Cette source d'énergie est nécessaire à la transition écologique, mais elle est encore peu mature technologiquement.



L'Eolien

L'Eolien utilise l'énergie cinétique du vent qui entraîne des pales convertissant cette énergie cinétique en énergie cinétique de rotation. Cela permet à un alternateur lié aux pales de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

L'éolien peut être **terrestre** ou « **offshore** ». L'option « offshore » commence à prendre de l'ampleur, avec par exemple la construction de parc éoliens offshore en France en 2021, dont la mise en service est prévue entre 2022 et 2024. Les éoliennes terrestres actuelles ont une



puissance de **2 à 4.5 MW** par éolienne et celles en mer entre **5 et 10 MW** (à titre de comparaison, la majorité des réacteurs du parc nucléaires français ont une puissance de **900MW**). Il est prévu que la prochaine génération d'éoliennes possède une puissance de **15MW**. L'éolien est l'énergie renouvelable dont le cycle de vie émet le moins de gaz à effet de serre (**12.7 gCO₂/kWh** pour l'éolien terrestre et **14,8 gCO₂/kW** pour l'éolien maritime), avec **95%** de la masse d'une éolienne constituée de matériaux recyclables.

Les énergies marines



Plusieurs énergies renouvelables d'origine marines existent. Les principaux avantages qu'elles présentent sont leur prédictibilité et, pour les courants, leurs quasi-continuité (de l'ordre de 20 heures par jour). Prometteuses, elles n'en sont encore qu'au début de leur développement et commencent à prendre de l'essor dans le contexte actuel de transition énergétique.

L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est l'énergie des marées, elle s'appuie ainsi sur les différences de hauteurs d'eau. Une usine marémotrice est donc un barrage qui, en retenant l'eau, crée une différence entre l'amont et l'aval. Le rétablissement de l'équilibre du niveau crée un déplacement d'eau important qui entraîne une turbine.

Certaines turbines comme la turbine Kaplan qu'on trouve à l'usine de la Rance (ci-contre), ont la particularité d'être réversible et donc de fonctionner dans les deux sens. Ces turbines sont liées à un alternateur qui produit l'électricité. Plusieurs projets sont en cours de développement à travers le monde et sont parfois associés à d'autres énergies.

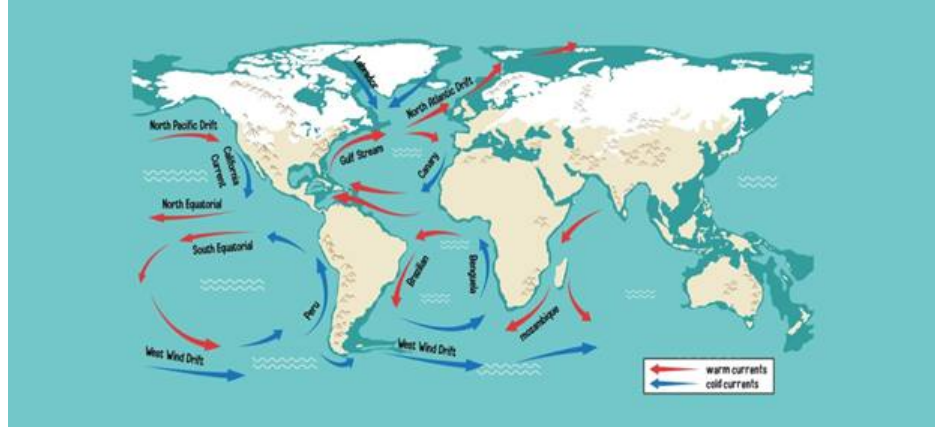


L'initiative du **European Marine Energy Centre (EMEC)** travaille à coupler une usine marémotrice à des batteries à flux au vanadium et à un électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert. Cette usine se situe sur l'île d'Eday en Ecosse.

L'énergie hydrolienne

L'énergie hydrolienne est l'énergie des courants marins. Les hydroliennes sont constituées de turbines entraînées par la marée ou les courants océaniques qui à leur tour entraînent un alternateur. Leur puissance est de l'ordre du kW. Les dernières innovations permettent de monter jusqu'au MW.

L'hydrolienne développée par **Eel energy**, entreprise innovante française créée en 2011, se base sur le biomimétisme pour produire de l'énergie par une membrane ondulante qui permet d'atteindre **10 MW** de puissance, fonctionne sur des courants faibles (0.7 m/s) et peut s'adapter à la vitesse et l'orientation du courant. Cette technologie est applicable à tous les types de courants.



VH Quatrevingtreize, entreprise ici aussi française développe une hydrolienne houlomotrice composée de matériaux biosourcés, plus particulièrement un composite de résine biosourcée de déchets végétaux, et de déchets industriels, qui captent du CO2 et sont recyclables à **99%**.

L'énergie houlomotrice

L'énergie houlomotrice est l'énergie des vagues. Grâce à sa grande disponibilité, le Conseil mondial de l'énergie estime que l'énergie houlomotrice serait en mesure de couvrir 10% de la demande annuelle mondiale. Quatre grandes familles de technologies existent pour récupérer l'énergie houlomotrice : les colonnes d'eau oscillantes, les systèmes à déferlement, les systèmes à flotteurs et les systèmes posés au fond.



Bien que le secteur soit en cours de développement, il est freiné par l'investissement élevé nécessaire qui génère des coûts de production de 200 à 300€/MWh. C'est donc une énergie intéressante sur le long terme.

L'énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers exploite la différence de température entre la surface et les grandes profondeurs. Cette énergie présente l'intérêt d'être disponible en continu. En revanche elle nécessite de grands investissements (20 M€/MW installé ce qui donne un coût de production de 500€/MWh) et possède actuellement un rendement très faible. C'est donc une technologie trop peu mature pour être intéressante à l'heure actuelle.

L'énergie osmotique

L'énergie osmotique utilise le gradient de salinité à l'embouchure des fleuves. C'est une énergie très particulière et encore peu développée tout comme l'énergie thermique des mers.

La start-up française **Sweetch Energy** a développé la technologie **Inod®**, des nanomembranes permettant de récupérer l'énergie osmotique.

La Biomasse

La biomasse regroupe les **espèces végétales et animales** que sont le bois, les déchets agricoles ou bien les ordures ménagères organiques. Ces matières fermentent et produisent du biogaz. La biomasse peut ainsi être brûlée avant fermentation ce qui permet de produire de la chaleur, de l'électricité ou les deux en cogénération ; ou bien transformée en biogaz lors du processus de méthanisation. Elle peut aussi être transformée en biocarburants. La biomasse n'est pas encore utilisée à son plein potentiel : en France $\frac{1}{4}$ seulement est utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Lors de sa combustion, la biomasse rejette tout le CO₂ que les plantes ont pu absorber au cours de leur vie. Si elle est renouvelable, ce n'est donc pas une énergie propre, mais faiblement carbonée, c'est pourquoi elle ne sera pas détaillée.

La Géothermie

L'énergie géothermique exploite la température élevée de l'eau dans les nappes du sous-sol de la Terre, de **150 à 350°C**. Cette eau est pompée, et son arrivée à la surface lui fait perdre de la pression et la transforme donc en vapeur qui va alimenter une turbine puis un alternateur. C'est donc une énergie décarbonée. L'énergie géothermique peut être récupérée par réservoir de **vapeur**, par réservoir d'**eau chaude** ou par **roches fracturées** (technique en cours de développement).



Tout comme pour les énergies marines, l'exploitation de la géothermie nécessite des coûts importants, notamment pour les infrastructures et le forage. De plus cette énergie n'est pas accessible partout, ce qui réduit la possibilité d'obtenir des financements. On note tout de même la présence d'innovateurs dans l'écosystème européen.

La société Suédoise **Climeon** a créé un système de génération d'électricité à partir d'énergie géothermique à basse pression et température (par rapport aux centrales géothermiques conventionnelles). Les unités peuvent être connectées entre elles, elles sont compactes. Elles ont été déployées en Islande en 2018 et ont doublé la production d'une centrale géothermique.

Selon **Árni Ragnarsson**, manager du projet **GeoWell** (projet européen de développement de techniques de conception et de réalisations de puits à destination du secteur de la géothermie), le domaine a du mal à s'essayer aux nouvelles technologies, préférant rester sur celles connues.

Biocarburants et e-fuels

Les biocarburants et e-fuels sont de nouveaux types de carburants, qui pourraient remplacer peu à peu les carburants conventionnels actuels. Tous les systèmes de l'armée française sont d'ailleurs compatibles à **50%** avec les nouveaux carburants.

Biocarburants

Les biocarburants sont définis par le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires comme « l'ensemble des carburants et combustibles liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse et destinés à une valorisation énergétique dans les transports et le chauffage » (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022).



On retrouve trois méthodes de production de bio-carburant qui diffèrent en fonction de l'origine de la biomasse:

- La première génération actuellement utilisée dans l'industrie a recours aux plantes riches en sucre, en amidon ou en huile.
- La deuxième, en cours de développement, utilise la partie non alimentaire des plantes.
- La troisième génération en est encore au stade de recherche sur l'utilisation des microorganismes photosynthétiques.

Deux grandes catégories de biocarburants co-existent actuellement : **Les biocarburants conventionnels**, dont l'acquisition de matières premières est en concurrence avec les achats pour l'alimentaire et **les biocarburants avancés**, produits à partir d'autres matières premières.

Les biocarburants permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, tout en réduisant la consommation de pétrole, en valorisant les déchets et en créant une nouvelle filière dans le domaine agricole. Pour les biocarburants de première génération des réglementations ont été mises en place au niveau national, européen et international afin de réguler leur utilisation dans l'industrie. Pour les carburants de seconde et troisième génération, plusieurs projets sont actuellement financés par des entités publiques pour faire avancer le développement de leur utilisation. L'ADEME a d'ailleurs lancé un appel à manifestation d'intérêt sur les biocarburants de deuxième génération. La France a inscrit l'utilisation des biocarburants pour l'aéronautique dans sa feuille de route nationale avec comme objectif final d'atteindre une part 50% de biocarburants dans ce secteur.

Le ministère des armées n'est toutefois pas un consommateur suffisant pour développer seul une filière de bio carburant.

E-fuels

Les e-fuels ou carburants de synthèse sont tous les carburants, sous forme liquide ou à l'état gazeux, produits à partir d'électricité renouvelable (issu du solaire ou de l'éolien par exemple) ou décarbonée. On les regroupe en deux catégories, selon l'état du produit final, et on distingue ainsi : Les E-fuels « Power-to-gas » (méthane et ammoniac synthétiques) des E-fuels « Power-to-liquid » (méthanol, pétrole, kérosène et diesel synthétiques). La plupart de ces carburants de synthèse sont produits à partir d'hydrogène et de dioxyde de carbone et leur usage rentre donc dans une politique de transition énergétique.

2. Le stockage de l'énergie : Un élément clé pour permettre la transition

La filière de l'énergie est en fort développement. Le stockage est un élément clé pour accompagner ce développement en garantissant la transition énergétique. Il permet par exemple de pallier le caractère intermittent de certaines énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire.

Les différents moyens de stockage

Stockage d'hydrogène

L'Hydrogène présente la particularité qu'il s'agit d'un gaz très léger et occupe peu d'espace par rapport aux autres gaz. Il est donc intéressant de stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

Un certain nombre de technologies pour convertir l'énergie sous forme hydrogène existent. Les plus développées actuellement sont :

- L'électrolyse MEP (Membrane Echangeuse de Protons), qui permet de produire de l'hydrogène grâce à l'électrolyse de l'eau.
- Les électrolyseurs de haute température en céramique qui fabriquent du gaz de synthèse à partir de dihydrogène et de dioxyde de carbone.
- La plasmolyse du méthane, un procédé de décomposition par plasma sans oxygène. Ce procédé permet de produire de l'hydrogène et du carbone solide sans émettre de CO₂.
- Le photo électrolyseur produisant du dihydrogène à partir de photons issus du rayonnement solaire.

Pour stocker l'hydrogène sous forme gazeuse, à haute pression, plusieurs solutions à bas coûts sont envisageables. L'utilisation de bouteilles de gaz facilement transportables par camions, le stockage dans des réservoirs au sein de stations-services ou véhicules à hydrogène qui permettra d'alimenter une pile à combustible hydrogène par exemple. Enfin le stockage massif souterrain est également envisageable.

Pour stocker l'hydrogène sous sa forme liquide, il faut recourir à sa liquéfaction, son refroidissement à très basse température. Par ce procédé, la masse volumique de l'hydrogène augmente et sa taille de stockage est réduite. La méthode est toutefois coûteuse et complexe et n'est utilisée que pour des usages très spécifiques comme les réservoirs de fusées.

Le stockage à hydrogène permet du stockage de long terme avec un vaste domaine d'applications. Notons enfin l'annonce faite par l'université australienne de **Deakin** en août 2022, les chercheurs en nanotechnologie ont découvert un moyen de stocker des gaz à température ambiante, dont l'hydrogène, sous forme de poudre, innovation qui pourrait largement simplifier son transport et son utilisation.

Stockage par batteries

L'usage de batteries pour stocker de l'énergie correspond à un besoin de stockage à court terme. Les batteries présentent toutefois l'avantage de pouvoir être utilisées pour un très grand nombre d'applications, que ce soit pour des véhicules hybrides ou électriques, le réseau électrique, etc. Les batteries actuelles ont une empreinte écologique majeure et nécessitent des matériaux critiques, peu importe le type de batterie :

- Les batteries **lead-based** : Au plomb, et donc peu compatibles avec une démarche de transition énergétique, ce sont les plus répandues.
- Les batteries **lithium-ion** : Ce type de batterie connaît un développement important. Toutefois, leur fabrication nécessite du cobalt qui devrait se raréfier à partir de 2023-2025. Les batteries lithium-ion ne sont donc pas des technologies durables.
- Les batteries à partir de nouveaux **composants chimiques** : En cours de développement, ces batteries sont fabriquées à partir de sodium ou de nickel. Leur production et utilisation s'inscrivent dans une démarche de développement durable mais le niveau de maturité de ces innovations est toutefois encore très bas.
- Les batteries « **flow** » ou « **redox flow** » : Elles sont constituées de deux liquides pompés de chaque côté d'une membrane. Rechargeables, elles présentent une longévité très importante. Toutefois, leur développement requiert actuellement des procédés de trop haute technologie pour obtenir un rendement en termes de puissance, qui plus est inférieur aux technologies concurrentes.
- Les batteries « **tout-solide** » : Elles sont conçues à partir d'électrodes sans solvant. Elles assurent ainsi plus de sécurité, une absence de coût de retraitement de ces solvants toxiques et une meilleure densité énergétique. Ce type de batteries est encore au début du développement.

Les principales problématiques à résoudre sur les batteries actuellement sont **la réduction de l'utilisation de cobalt, le vieillissement, la sécurité, les batteries** étant par exemple très sensibles à l'emballage thermique et le rapport coût/densité énergétique (qui s'accompagne ainsi d'une réduction de la masse de la batterie).

De nombreux innovateurs commencent à investir le marché, en voici quelques exemples :

- **Blackleaf**, entreprise française fondée en 2018, produit du graphène de manière peu coûteuse, respectueuse de l'environnement, en grande capacité et aux applications multiples. Le graphène entre notamment dans la fabrication de batteries sans métaux pour le stockage d'énergie.
- **Verkor** se donne pour mission d'accroître la production de batteries bas-carbone en Europe pour répondre à la demande en hausse pour les véhicules électriques. La société française fondée en 2020 a sélectionné le site du Port de Dunkerque pour construire sa première usine de production de cellules lithium-ion, de l'ordre de 16 GWh par an (ce qui permet d'équiper 300 000 véhicules électriques) pour atteindre 50 GWh en 2030.
- **ACC**, le concurrent direct de Verkor, possède également plusieurs Gigafactories, en France, en Italie et en Allemagne. L'entreprise met également l'accent sur sa vision éco-responsable jusqu'au bout de la chaîne. Pour l'extraction des minerais nécessaires, elle se fonde sur plusieurs critères, par exemple « la non-utilisation de cobalt provenant de mines artisanales de la République démocratique du Congo ; la non-utilisation de nickel provenant de mines qui rejettent leurs résidus en mer ; l'absence de lithium provenant de mines créant un stress résiduel sur les réserves d'eau ou de minerais provenant de zones de conflit. » (Site institutionnel de l'entreprise). L'entreprise est également en train de créer une filière de recyclage avec d'autres acteurs.

Une alliance européenne sur les batteries est en train de se mettre en place pour récupérer une souveraineté technologique et une autonomie par rapport à la Chine (voir Annexe 14 pour une cartographie de la production mondiale de batteries). Cela se destinerait principalement au secteur automobile, le consommateur majeur, et l'accent serait mis pour créer des batteries avec l'empreinte environnementale la plus faible possible, de l'extraction au traitement des déchets. Le secteur militaire pourrait profiter de cette alliance, mais il devra veiller à introduire les caractéristiques nécessaires au secteur dans l'alliance : le niveau de fiabilité doit être important, la logistique sur le terrain est plus lourde et les batteries doivent être changées régulièrement. Il faudra par ailleurs des financements pour accompagner la demande croissante de batteries à des fins militaires.

Stockage électrique

Pour le stockage électrique, deux technologies sont utilisées : les **supercondensateurs** et les **Superconducting Magnetic Electricity Storage (SMES)**.

Un supercondensateur est une technologie de stockage reposant sur des interactions électrostatiques entre les ions d'une électrolyte liquide et les charges électroniques à la surface d'électrodes. Ce mécanisme est hautement réversible et offre un taux de recharge très rapide. Les supercondensateurs sont principalement destinés aux applications de haute puissance comme les réseaux électrique, l'automobile, le ferroviaire ou l'aéronautique. Les supercondensateurs ont une bien meilleure durée de vie et une meilleure résistance aux températures négatives que les batteries, néanmoins leur densité énergétique est largement inférieure.



Parmi les supercondensateurs de nouvelle technologie on trouve les supercondensateurs **NAWACap Power** aux électrodes de carbone ultra-rapides, commercialisés par l'entreprise **Nawa Technologies**. Ces supercondensateurs « offrent des densités de puissance entre 10 et 100 fois supérieures aux super condensateurs existants. Leur Résistance Série Equivalente (Equivalent Series Resistance = ESR) est plus de 10 fois inférieure. » (site institutionnel de l'entreprise). Les supercondensateurs **NAWACap Power** sont également résistants aux hautes et basses températures.

Le **Superconducting Magnetic Electricity Storage (SMES)** utilise les principes d'électromagnétisme pour stocker de l'électricité. On distingue les **Low Temperature Superconductors (LTS)** des **High Temperature Supraconductors (HTS)**. Le principe est le même pour les deux types : un courant électrique parcourant une bobine crée un champ magnétique dont les variations engendrent un champ électrique, une chute de tension. La bobine est cryogénisée à une température proche du zéro absolu (aux alentours de 4K pour les LTS et entre 30 et 60K pour les HTS). Ainsi, la résistivité du système est quasi nulle et il peut donc stocker un courant électrique sur une très longue période sans pertes mesurables. L'énergie emmagasinée et délivrée est régulée par un contrôleur modifiant l'intensité du courant.

Le SMES possède un rendement de **90-95%** ainsi qu'une durabilité importante d'une trentaine d'années. Sa puissance élevée est limitée uniquement par l'isolation des composants électriques et électroniques et son temps de réponse est très court, de l'ordre de 5ms. Ce système de stockage peut également être couplé avec un autre système de stockage de grande capacité. Le système de refroidissement peut provenir d'une source de l'environnement : hôpitaux, carrière d'azote liquide... Enfin, le SMES n'utilise pas de matières premières critiques mais uniquement **des matériaux standards**. L'une des limites principales au développement du système concerne plutôt les HTS est la protection des aimants qu'ils utilisent. Ainsi le projet Super SMES a été mis en place pour développer la technologie des aimants à haute température critique qui conviendraient à des SMES à forte densité d'énergie massique. L'objectif serait de doubler la valeur actuelle de **10kJ/kg**.

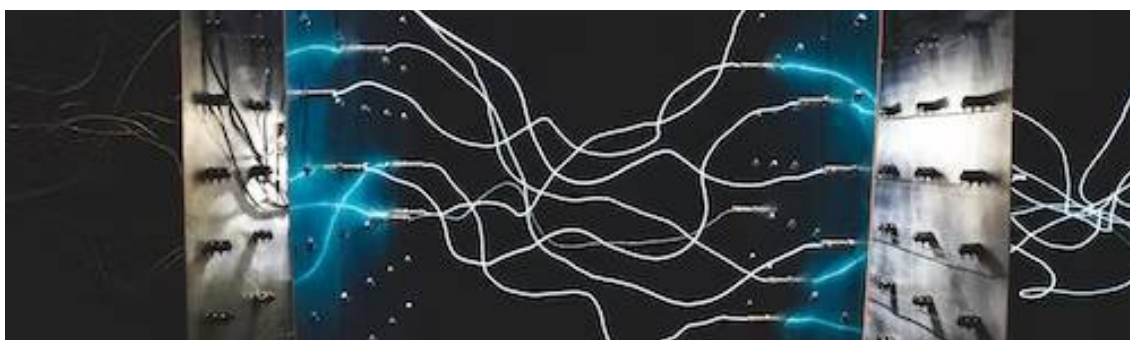




Dans le domaine militaire le **SMES** peut être utilisé pour les FACTS[1] (Flexible AC Transmission System), des systèmes permettant de garantir une stabilité aux lignes de transmission dont certains se situent dans des véhicules. Il sert aussi dans le domaine aérospatial, pour des lanceurs. Enfin, le SMES pourrait servir pour alimenter des véhicules. Pour les bases militaires cependant, ce système apparaît trop coûteux et nécessiterait de plus un grand système de refroidissement, potentiellement indisponible en **OPEX**.

Stockage mécanique

Parmi les principales technologies de stockage mécanique on trouve le **Compressed Air Energy Storage**, le **Liquid Air Energy Storage**, le **Flywheel** (volant d'inertie) et la **STEP**. Ces stockages mécaniques apparaissent peu adaptés aux contraintes du secteur de la défense, *ils ne seront donc pas détaillés ici*.



Stockage d'énergie thermique

Parmi les principales technologies de stockage d'énergie thermique on trouve:

Le Sensible Heat Storage. C'est le type de stockage le plus commun, utilisé dans le secteur de l'industrie et dans le résidentiel. Il repose sur les changements de température.

Le Latent heat storage, reposant sur les changements de phase.

Le Thermochemical heat storage utilisant les réactions chimiques.



Le stockage d'énergie thermique n'étant pas le cœur du sujet dans ce livre blanc, nous avons fait le choix de ne pas détailler davantage.

Tableau comparatif des solutions de stockage

Les nombreuses énergies bas-carbone présentées dans cette partie montrent qu'il existe un vaste panel de moyens pour répondre à la transition énergétique. Cependant, chaque énergie vient avec son lot d'avantages et de contraintes, et ne convient pas à tous les cas d'usage. De plus, si le processus physique de production d'énergie n'émet pas de dioxyde de carbone (c'est le cas de la fission nucléaire ou de l'électrolyse de l'hydrogène par exemple), il n'en va pas de même pour la logistique associée (construction des infrastructures, approvisionnement en matières premières, ...). C'est également le cas pour les différents types de stockage, dont les principales caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Stockage d'électricité	Stockage chimique	Hydrogène	• Stockage long terme • Vaste champ d'applications • Technologies peu matures • Pas encore de filière de recyclage
	Stockage électrochimique	Batteries	• Nécessite des matériaux critiques • Sensible à l'emballage thermique • Pas encore de filière de recyclage
	Stockage électrique	Supercondensateurs	• Taux de recharge très rapide • Adaptés aux applications de haute puissance • Meilleure durée de vie et résistance aux températures négatives que les batteries • Densité énergétique inférieure aux batteries
		SMES	• Stockage long terme • Durabilité importante • Rendement de 90-95% • Temps de réponse très court • Nécessite une source froide importante • Coûteux
	Stockage mécanique	Compressed Air Energy Storage, Liquid Air Energy Storage, Flywheel et STEP	Volumineux
	Stockage thermique	Sensible Heat Storage, Latent Heat Storage et Thermochemical Heat Storage	Non détaillé ici

Tableau 1 : Tableau comparatif des solutions de stockage d'énergie (source : Mind2shake).

Pour le secteur de la défense, l'électrification apparaît comme une des solutions les plus intéressantes. Néanmoins, l'électricité doit être produite de manière décarbonée, l'électrification nécessite des matériaux critiques et il est nécessaire d'obtenir des investissements massifs. L'électrification peut ainsi s'accompagner du développement de l'énergie nucléaire ou de l'hydrogène pour produire suffisamment d'électricité décarbonée. Les biocarburants et e-fuels semblent émerger, en particulier en tant que Sustainable Aviation Fuel (SAF), mais ils ne sont pas encore suffisamment matures technologiquement pour être développés à grande échelle. Il convient maintenant d'étudier comment implémenter ces énergies pour répondre aux besoins des armées en restant en accord avec la transition énergétique.



DÉCARBONATION ET DÉFENSE

1 Solution de mobilité décarbonée

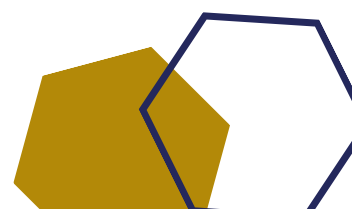
L'usage de bio-carburants et e-fuels 51

L'usage prometteur de l'hydrogène 52

2 Réflexion en cours sur la décarbonation des infrastructures militaires : Les spécificités des infrastructures de Défense

3 La dimension RH au cœur de la transition

.....



Les technologies liées aux énergies bas-carbone sont en pleine croissance, et il en existe à tous les stades de maturité. Ce n'est pas pour autant que toutes peuvent répondre aux besoins des armées. **Quels sont les points à considérer pour réfléchir à leur usage dans les armées ?**

- **Le point primordial est le maintien de la capacité opérationnelle.** Cela implique de prendre en compte le besoin de redondance, ou encore de raisonner sur les trois modes de fonctionnement classiques dans les armées : nominal, alternatif et dégradé.
- **Il faut ensuite réfléchir par cas d'usage.** Une base située dans la bande Sahélo-Saharienne nécessite par exemple une solution devant résister à des températures extrêmes avec une exposition continue. Concernant la mobilité, il est important de faire une distinction entre les différents usages des véhicules, selon 3 critères majeurs : **l'autonomie, la vitesse pour faire le plein, et les conséquences de l'utilisation du carburant sur le poids.** Le carburant fossile présente de belles caractéristiques, il ne coûte pas cher, est relativement léger et permet une bonne autonomie mais c'est une énergie épuisable aux conséquences environnementales graves. A ce jour, toutes les alternatives sont moins efficaces que le carburant fossile sur ces 3 critères. Cependant, les technologies progressent et permettraient de changer de source d'énergie tout en maintenant la capacité opérationnelle nécessaire.
- **Il est également nécessaire de prendre en compte l'écosystème** dans lequel évoluerait la solution. Ainsi, en sachant que l'Union Européenne a pour ambition de développer un réseau électrique européen intégré pour continuer de faciliter l'interconnexion, il est préférable de penser la distribution électrique en métropole à l'échelle européenne plutôt que nationale, un effet sur un pays voisin pouvant se répercuter sur la France.
- **Par ailleurs, les nouveaux enjeux de sécurité de la société et les nouvelles menaces doivent régulièrement être pris en compte.** Ainsi la cybersécurité, la protection (contre le terrorisme par exemple) ou les menaces d'attaques de drones doivent être intégrées dès la phase de conception de tout projet, qu'il s'agisse de construction neuve ou d'évolution.
- **La solution doit être pensée dans sa globalité, des premières études jusqu'au recyclage ou au démantèlement,** en s'assurant bien entendu de la disponibilité des compétences nécessaires, ou encore que la solution soit en accord avec la réglementation applicable.

De manière générale, le secteur de la défense peut profiter du développement de solutions dans le domaine civil. En effet les problématiques des deux domaines sont souvent similaires, et malgré une adaptation non négligeable de ladite solution, la base de la technologie ne change pas. On voit ici l'importance du rôle de l'Agence d'Innovation de Défense (AID) sur ces sujets d'énergies, par sa capacité à aller rechercher des solutions à vocation duale. Par le biais de la Red Team, l'AID pourra imaginer des solutions futuristes de décarbonation dans la défense.

La suite du chapitre aborde ces sujets de transition énergétique au travers de la mobilité et plus particulièrement du véhicule terrestre et de la base militaire du futur. Elle évoque des pistes de réflexion, une ouverture sur certaines technologies et les problématiques à résoudre si certaines solutions venaient à être implantées. Cela ne se veut en aucun cas une liste exhaustive de ce qu'il est possible de réaliser.

1. Solutions de mobilité décarbonée

L'usage de bio-carburants et e-fuels

D

es projets de décarbonation des solutions de mobilité des armées ont été initiés, notamment le recours aux bio-carburants et e-fuels ainsi que l'hybridation de véhicules blindés.

L'usage des biocarburants et e-fuels est inscrit dans la feuille de route nationale de la France de mettre des biocarburants dans le carburant dédié à l'aéronautique (SAF). L'objectif est d'y recourir pour 1% en 2022, 5% en 2030 et 50% en 2050. Aujourd'hui, sur 800 000 m3 de carburants distribués par le SEO aux forces armées, 1% provient de biocarburants.

Grâce à la politique de carburant unique, les groupes électrogènes pourraient fonctionner au carburéacteur, contenant donc du biocarburant. Cette solution a pour seule contrainte de préparer les groupes de telle sorte à ce qu'ils puissent accepter ce carburéacteur. Des essais en laboratoire sont menés pour rechallenge le carburant unique avec du biocarburant. Cependant, les biocarburants, en particulier ceux de première génération, posent un problème de préservation des ressources alimentaires. En effet, les surfaces agricoles utilisables sont progressivement allouées à la production de biocarburant au dépend de matières premières à destination des filières agroalimentaires.

Pour s'inscrire dans une démarche durable, les armées doivent donc se tourner vers l'usage de biocarburants de deuxième ou troisième génération, encore très peu matures.

L'**hybridation** des véhicules a aussi été initiée. Le véhicule **Griffon** est le premier à faire l'objet de cette hybridation et un démonstrateur devrait arriver en 2025. Il est réalisé par le **Groupeement Momentané d'Entreprises (GME) « Engin Blindé Multi-Rôles »** (EBMR) constitué d'**Arquus**, de **Nexter** et de **Thales**, à la demande de la **Direction Générale de l'Armement (DGA)**. Le Griffon est un Véhicule Blindé **Multi-Rôles** (VBMR), successeur du Véhicule de l'Avant Blindé (VAB). Ce véhicule évolue sur des terrains difficiles, qui requièrent donc une grande puissance moteur, une électrification totale n'est donc pas

envisageable avec les technologies actuelles. Un compromis optimal est donc l'hybridation : un (ou plusieurs) moteur(s) thermique(s), un (ou plusieurs) moteur(s) électrique(s) et des batteries pour le stockage électrique. L'électricité est générée lorsque le véhicule est en mouvement, il n'y a donc pas besoin de l'alimenter en électricité. Le Griffon n'a pas été conçu comme un véhicule hybride, cependant il a été pensé pour passer d'un mode complètement thermique à un mode hybride, le volume nécessaire à la partie électrique ayant été pris en compte dans la conception et la réalisation. Cette mesure conservatoire est particulièrement pertinente pour des engins comme le Griffon, dont la durée de vie est de plusieurs décennies et qui pourraient donc connaître plusieurs technologies. Il est par ailleurs intéressant que cette réflexion sur l'évolutivité des porteurs ait aussi été prise en compte pour les bateaux de dernière génération (citons aussi les Chalant Multi Mission, CMM, bateaux hybrides à propulsion thermique et électrique utilisés pour l'entraînement et certaines missions plutôt proches des ports).



L'hybridation offre par ailleurs de nombreux avantages tactiques. Tout d'abord, le Griffon passe en électrique au « **dernier kilomètre** », juste avant la zone de danger. Les moteurs électriques étant beaucoup plus silencieux que les moteurs thermiques, ils assurent discrétion et furtivité. L'hybridation est également avantageuse en mode stationnaire : le moteur électrique peut continuer de fonctionner, il est donc possible d'actionner l'air conditionné par exemple. Enfin, le véhicule hybride permet de transférer en régime électrique des équipements nécessitant une puissance importante, réduisant ainsi la consommation de carburant et augmentant l'autonomie. Le secteur militaire est en revanche obligé de développer spécifiquement des batteries à haut niveau de sûreté/sécurité pour répondre à ses attentes. Un des enjeux de l'hybridation est d'ailleurs celui de la standardisation des batteries pour avoir des normes communes à l'UE. Il est donc important pour la France de participer activement voire de mener les négociations sur la standardisation des batteries pour éviter des normes inadaptées ou des désavantages compétitifs. Autre sujet d'importance, le type de batterie retenue pour l'hybridation. A ce jour il s'agit de batterie lithium-ion, plus facile à entretenir que la batterie au plomb. Néanmoins, elles présentent un certain nombre de risques à adresser. La **DGA** a ainsi demandé une pré-étude au GME EBMR pour l'intégration de celles-ci au sein du Griffon. Des essais abusifs (tirs, écrasement...) ont été réalisés, ce qui a permis d'obtenir une bonne vision des risques, contraintes et méthodes d'intégration. Les travaux ont permis de montrer l'importance de la façon dont les batteries sont liées entre elles, et aussi la conception de leur structure interne pour empêcher l'emballement thermique. Notons que le coût de ces études est déjà pris en charge par le ministère des armées. **Arquus** faisant partie du groupe Volvo, particulièrement orienté vers le domaine du civil et de l'électro-mobilité, a pu profiter des compétences et de la recherche de sa maison mère pour le secteur civil.

Ainsi, pour la plupart des engins tactiques (tout terrain, ou terrain particulièrement dur), l'hybridation apparaît une excellente solution.

L'usage prometteur de l'hydrogène

Si l'hybridation des véhicules militaires possède de nombreux avantages, elle ne permet pas de se libérer complètement du pétrole, les biocarburants étant encore loin de pouvoir totalement le remplacer. Une autre source d'énergie semble émerger : l'hydrogène. Cette source d'énergie présente des usages intéressants tant pour la mobilité que pour les infrastructures de Défense. Selon l'**IFPEN**, pour les solutions de mobilité, l'hydrogène apparaît plus adapté aux poids lourds qui nécessitent une autonomie importante et la possibilité d'un temps de recharge court par rapport aux recharges des batteries (quelques heures). A noter que le temps de recharge d'un véhicule hydrogène est légèrement plus long que celui des motorisations essence/diesel actuelles (une recharge d'hydrogène nécessiterait une quinzaine de minutes, et entre trois et cinq minutes pour un carburant traditionnel). Actuellement deux solutions sont envisagées pour motoriser des véhicules à l'hydrogène : la pile à combustible ou le moteur à injection directe à hydrogène.

La pile à combustible (PAC), Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) en anglais, est une technologie adaptée à des véhicules de charge moyenne à importante nécessitant une autonomie moyenne à importante. Elle possède cependant de multiples contraintes : elle est sensible aux chocs, aux vibrations et aux changements thermiques. Par ailleurs la filière de recyclage n'est pas du tout développée à ce jour, même si en théorie les PAC pourraient être réutilisées dans d'autres cadres, comme les groupes électrogènes à hydrogène.

Le moteur à injection directe à hydrogène paraît être une solution accessible sur le court ou moyen terme. Ce type de moteur (ou des moteurs fonctionnant au polycarburant hydrogène-fioul) ne casse pas toute l'architecture du véhicule qui pourrait être remodelisée avec des composants plus facilement intégrables. La chaîne de production est déjà globalement existante car elle est très proche de celle des moteurs thermiques actuels. Toutefois, l'implémentation de ce moteur à hydrogène va grandement dépendre de la réglementation nationale et européenne à venir. Le domaine civil voit de plus en plus arriver la fin des moteurs thermiques pour les automobiles et camionnettes, même si la législation n'est pas encore figée. Des grands groupes comme Stellantis ont d'ailleurs fait le choix stratégique de ne plus investir dans le développement des moteurs thermiques. **Si les offres de moteurs thermiques diminuent voire disparaissent sur le territoire national et européen, le secteur de la défense risquerait de devoir acheter des moteurs thermiques à des pays n'étant pas forcément des alliés de la France.**

Le moteur à injection à hydrogène pourrait ainsi permettre d'écarter ce risque, à condition que ce type de technologie soit autorisé par la réglementation. Pour que cette solution soit viable, il est nécessaire que le coût de production de l'hydrogène vert baisse drastiquement, que la sûreté de stockage soit assurée (l'hydrogène devant généralement être stocké à pression élevée), que le rendement énergétique augmente et enfin, qu'une chaîne d'approvisionnement se développe.

Pour le développement de la chaîne d'approvisionnement, le secteur militaire doit et peut compter sur le secteur civil.

Un projet qui permettrait de faire grandir massivement la filière de l'hydrogène est le projet de **hubs hydrogène**, une recommandation évoquée par le **Comité National des Conseillers du Commerce Extérieur de la France** (CNCCEF) dans son livre blanc sur l'hydrogène. Ces hubs constitueraient des écosystèmes territoriaux de production et consommation d'hydrogène, et seraient développés à l'échelle européenne par exemple le long de l'artère **Danube-Rhin-Rhône** reliant la mer du Nord, la Manche, la Méditerranée et la mer Noire où sont situées des infrastructures industrialo-portuaires et urbaines de qualité. Ainsi, des hubs de production d'hydrogène et des corridors



multi-usages pourraient se développer à moindre coup grâce aux opportunités offertes par le territoire comme les réseaux de transport lourd ou les centres urbains.

Les territoires ultra-marins aux réseaux non interconnectés français possèdent également de nombreuses opportunités exploitables. En effet, ils pourraient faire office de vitrine des compétences françaises en termes d'autonomie énergétique, de mobilité terrestre et maritime et de décarbonation, notamment auprès des marchés extérieurs de l'Asie-Pacifique.

L'objectif de ces initiatives est de développer la filière de l'hydrogène, ce qui aura pour effet de faciliter la réalisation de solutions à base d'hydrogène dans le secteur de la défense. Cependant, de nombreux obstacles réglementaires persistent. Le projet HyLAW, coordonné par Hydrogen Europe, qui rassemble 23 pays a pour but de donner une vision globale réglementaire aux « market developers » et alerter les décideurs sur les barrières réglementaires. Pour cela, une base de données en ligne publique relevant toutes les données réglementaires ayant trait à l'hydrogène et à la technologie des piles à combustible a été mise au point, et des livrables ont été rédigés par les membres du projet. Parmi ces livrables on trouve le document sur la politique de l'Union Européenne de 2019 dans lequel HyLAW identifie plusieurs freins à l'avenir de la filière hydrogène dans les réglementations européennes, comme par exemple l'absence de distinction entre les méthodes de production selon leur impact environnemental, qui n'avantage donc pas la production d'hydrogène décarboné. En effet la traçabilité de l'hydrogène est primordiale dans un contexte de crédits carbone (C2E) garantissant la production d'énergie décarbonée, ainsi que la taxe carbone qui devrait se mettre en place en 2025.

Envisager de passer des véhicules militaires terrestres à l'hydrogène nécessite en revanche de repenser toute la chaîne logistique.

L'entreprise française H2X Ecosystems a ainsi développé une méthodologie de développement d'écosystèmes territoriaux à hydrogène en fonction des besoins, en collaboration avec l'AFNOR. Cette méthodologie est pour l'instant appliquée à des territoires français, comme la ville de Redon, mais ses grands concepts peuvent être repris dans le cadre de la défense afin de repenser la chaîne logistique (ex : utilisation des ressources locales, adaptation de la solution technique au modèle économique souhaité ect). H2X Ecosystems produit également des technologies hydrogène comme des piles à combustible, des générateurs d'hydrogène ou des réservoirs de stockage.

2. Réflexion en cours sur la décarbonation des infrastructures militaires : Les spécificités des infrastructures de Défense

Plusieurs axes complémentaires de décarbonation des infrastructures militaires sont en cours de réflexion et de développement.

Le ministère des armées planche sur l'optimisation de l'énergie de manière à réduire sa consommation tout en maintenant les capacités opérationnelles. Plusieurs projets s'y intéressent, comme le projet GENOPTAIRE (voir chapitre 1) à l'échelle française ou le European Union Training Mission in Mali (EUTM Mali) à l'échelle européenne.

Le raccordement des infrastructures militaires aux réseaux de chaleur (chauffage et climatisation) urbains est aussi envisagé pour accélérer la décarbonation. Cela pourrait permettre de réduire de 80% les émissions de GES. En effet, ces réseaux se tournent de plus en plus vers les énergies renouvelables ; et certaines industries rejetant de la chaleur dans le réseau urbain participent à la circularité des ressources. En 2019, environ 50 sites du ministère ont été raccordés aux réseaux urbains.

Enfin, l'utilisation d'énergies renouvelables et décarbonées pour alimenter les infrastructures militaires est en cours de réflexion. Le **SID** recense actuellement les sites pouvant expérimenter, voire adopter si des tests ont été concluants, l'énergie solaire photovoltaïque, thermique, éolienne ou provenant de la biomasse. Par exemple, d'ici **2023** de la biomasse locale devrait être convertie en biogaz au camp de Coëtquidan. Pour faire usage de l'énergie solaire, la DGA travaille avec **H2P Systems** pour développer des générateurs solaires fonctionnant en continu. Pour cela, des cellules solaires miroirs concentrent les rayons solaires sur un receveur, développé par le CEA.



De l'air passe par ce point chaud, et l'air chauffé vient ensuite alimenter le moteur produit par H2P qui convertit cet air en électricité. Cette technologie ne nécessite pas de batteries chimiques et est donc moins contraignante que des panneaux photovoltaïques.

L'hydrogène est également une piste à étudier, en particulier pour trouver des solutions conjointes aux infrastructures et leur mobilité. Plusieurs solutions stationnaires sont en développement, certaines sont présentées dans la partie II.

Pour suivre les avancées du secteur civil en la matière, il pourrait être pertinent de s'intéresser à la ville du futur créée par Toyota, Woven City. Il s'agit d'une ville-laboratoire située à Susono City au Japon, au pied du mont Fuji. Les premiers résidents devraient emménager en 2024-2025. L'objectif du projet est de développer la mobilité en ayant la possibilité de tester les solutions dans une « vraie » ville regroupant familles, personnes âgées, inventeurs etc. et ce en respectant les 17 objectifs de développement durable (énergie propre et d'un coût abordable, consommation et production durables, mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques, ...) fixés par les Nations-Unies (NU, Recueil des Traités, p.107). Toyota développera donc la mobilité en lien avec un grand nombre de domaines comme la santé, l'agriculture ou encore l'énergie, en souhaitant atteindre le bien-être des utilisateurs. Woven City sera en particulier équipée d'infrastructures de production, stockage et distribution d'hydrogène ainsi que de véhicules à pile à combustible.

Le concept de ville-laboratoire est intéressant, et l'adaptation d'un tel concept pour des bases militaires mérite réflexion.

Il est enfin important de noter que chaque infrastructure de défense possède ses propres contraintes, et qu'il faut donc différentes sources d'énergie en fonction de celles-ci, et une installation spécifique à chacune (par exemple prévoir des panneaux autonettoyants pour résister au sable et à la poussière en OPEX dans la bande Sahélo-Saharienne). Cela dit, bien qu'à l'échelle des armées un mix d'énergies soit nécessaire, il est plus complexe de multiplier les énergies en OPEX que de ne se contenter que d'une seule.

Certaines énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien ont la particularité d'être intermittentes. Il est donc nécessaire de pallier aux manques par le stockage ou l'apport d'une autre forme d'énergie.

L'un des projets les plus importants sur ce domaine, et plus généralement sur la gestion de l'énergie dans les bases militaires est le projet ENergy Self SUFFicient and REsilient military base (ENSSURE). Ce projet, porté par la France et soutenu par le Consultation Forum for Sustainable Energy in the Defence and Security Sector (CF SEDSS) et l'Agence Européenne de Défense (AED), a pour but d'étudier la faisabilité d'une autonomie énergétique des bases permanentes militaires de petite ou moyenne taille. Une plus grande autonomie énergétique permettrait également de réduire voire se passer de la chaîne logistique qui apporte de la vulnérabilité aux opérations.

En complément de ces axes, il est nécessaire d'améliorer l'isolation des bâtiments. L'isolation représente un investissement ponctuel majeur mais permet de faire des économies sur le long terme. Comme expliqué en début de chapitre, il est inenvisageable de penser transition énergétique sans l'associer à une réduction de la consommation.

Pour aider à implémenter ces différentes solutions, une vision claire des diverses politiques, des nombreux financements et réglementations liés au développement durable, sous la forme d'un rapport par exemple serait particulièrement pertinent.

3. Une dimension RH au cœur de la transition

Tous ces projets nécessitent des compétences, pour les réaliser, les mettre en œuvre et les maintenir durant leur durée de vie. Une nouvelle filière de formation va devoir ainsi émerger.

Certaines entités possèdent déjà leur propre centre de formation, comme l'IFPEN qui détient une école proposant des diplômes d'ingénieur·e spécialisé·e, ainsi qu'un centre de formations pour les entreprises. Pour d'autres c'est un projet qui n'est pas encore concrétisé, comme H2X Ecosystems qui souhaiterait proposer des formations et à terme monter une académie.

Une fois apprises, **il est également nécessaire de maintenir les compétences acquises.** Par exemple l'armée de Terre possédait des compétences pour le transport ferroviaire. Ce type de transport ayant été relativement peu utilisé, les compétences ont été perdues. Elles pourraient toutefois être redéveloppées, notamment avec les nouvelles technologies hydrogène ou électrique, rendant le transport par voie ferrée encore plus efficace en en faisant un mode de transport décarboné, capable d'acheminer des hommes, ressources ou équipements rapidement et en grand nombre.

Il faut donc bien penser aux filières métier en association avec cette transition énergétique, quelles que soient les énergies retenues afin de ne pas devoir tout sous-traiter à des entreprises privées et voir nos armées entièrement dépendantes de capacités externes.



CONCLUSION

L'impact de la crise écologique sur les forces armées est important, que ce soit sur les conditions de température en combat, les missions des armées ou la pertinence des solutions énergétiques en place. D'ici quelques années, elle va sûrement venir modifier en profondeur les usages des armées pour s'adapter au changement climatique. Actuellement, la Marine fait déjà face à l'augmentation du niveau des mers, qui n'est pas tant causée par la fonte des glaciers que par la dilatation de l'eau due au réchauffement climatique. Rapidement, il faudra ainsi repenser les bases insulaires, qui doivent être surélevées pour ne pas être inondées. Pour se faire, des sources d'énergies sous forme de modules flottants comme les centrales solaires flottantes Dweeps de Sea 6 Energy (présentées dans le chapitre 2) pourront être une solution envisageable à adapter car ce type de solution se déployant sur une surface importante, cela peut poser des problématiques de sécurité, ne serait-ce que du point de vue surveillance aérienne et sous-marine de la zone occupée.

Outre les contraintes qu'elle pose aux armées et à la BITD dans son ensemble, la transition énergétique est également l'occasion de faire émerger des innovations, développer les compétences du secteur de la défense et repenser de nombreux domaines (bases, OPEX, mobilité, logistique, recyclage, etc.) pour les rendre encore **plus performants et surtout moins dépendants d'actifs étrangers**. Une nécessité s'impose alors: trouver de nouvelles sources d'énergies, décarbonées, qui s'appuient sur une réduction de la consommation énergétique. Cette transition énergétique reste complexe et coûteuse, mais les pays qui s'y engageront le plus tôt seront ceux qui en tireront le plus de bénéfices.

« Gagner la guerre avant la guerre » disait le Général Burkhard Chef d'Etat Major des Armées, la formule prend tout son sens lorsque l'on parle de transition énergétique !

Les armées françaises peuvent compter sur leur capacité à anticiper pour s'adapter au changement climatique, tout en tirant des leçons des erreurs du passé. Elles peuvent et doivent également s'appuyer sur le secteur civil, riche en ressources et innovations.

Dans la démarche de transition énergétique, l'Europe doit être motrice de coopération entre les armées des différents pays membres. Concilier les intérêts et mettre en place une coopération interétatique permettra de partager leurs connaissances, compétences, les coûts et les risques pour engranger de nouvelles filières énergétiques durables. Pour se placer en tant que pionniers européens en matière de transition énergétique, il sera nécessaire de s'accorder sans trop complexifier, la complexification étant source de tensions comme on a pu le voir par le passé sur certains projets du domaine de la Défense.

D'un point de vue technologique, pour accélérer la transition énergétique des solutions de mobilité des armées, deux grandes solutions se distinguent : l'électrification (plus ou moins accompagnée d'hydrogène et de nouvelles catégories de batteries ou de moteurs) et l'usage de carburants de synthèse ou d'origine renouvelable. Bien qu'elles présentent encore de nombreux défis techniques à résoudre, ces solutions pourront à terme permettre d'atteindre l'indépendance énergétique.

Le nucléaire et l'hydrogène sont les énergies qui pour le moment paraissent les plus adaptées pour répondre aux besoins des armées. Encore peu étudiées pour répondre aux usages de la défense, ces sources d'énergies présentes de nombreuses opportunités de développement pour les faire correspondre aux exigences du secteur.

Il sera aussi indispensable à moyen-long terme de penser dans une logique écosystème afin de faire se coordonner entre elles les différentes solutions qui seront mises en place.

Afin de développer et produire ces solutions, la **BITD** va être un atout majeur et va ainsi nécessiter un accompagnement. Actuellement, les progrès en termes de développement durable sont freinés par le manque d'investissements, un accès au marché plus difficile pour la défense européenne. L'adaptation des technologies aux usages de la défense est surement freinée aussi par ce manque d'investissements et une image mitigée de la société sur le secteur. Même s'il ne faut pas s'en réjouir, le contexte de guerre actuel commence déjà à influencer positivement sur le financement de l'innovation dans le secteur. Le nouveau concept de taxonomie introduit en 2020, qui classe les activités bas-carbone ou contribuant à la décarbonation impactera aussi les nouveaux investissements, on l'espère positivement.

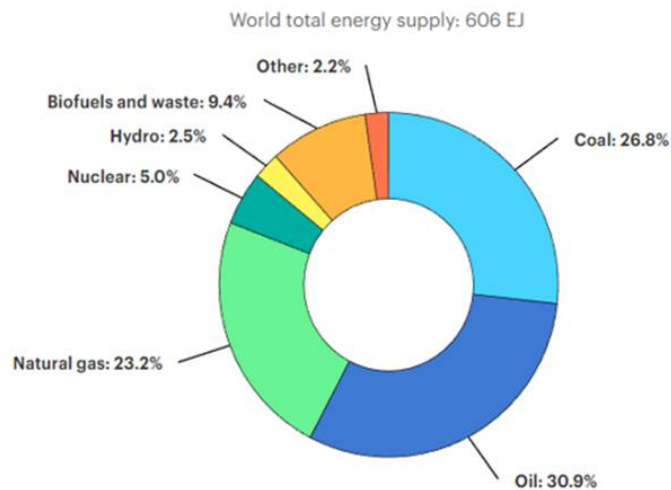
Parce qu'il ne faudrait pas que l'armée française soit la « grande muette » de la transition énergétique, il apparaît indispensable que le Ministère des Armées communique efficacement sur les mesures prises en matière de développement durable.

Enfin, il convient d'avoir toujours en tête qu'une solution peut avoir un impact indirect sur l'environnement extérieur. En OPEX, l'armée peut impacter positivement ou négativement la stabilité d'un pays dans lequel elle s'approvisionne en énergie. La responsabilité est lourde mais les armées françaises pourraient être l'accélérateur de la transition énergétique dont la France a besoin pour sortir d'une dépendance aux énergies carbonées encore largement souligné par le conflit ukrainien. L'innovation ouverte portée par l'Agence Innovation de Défense, l'innovation capacitaire portée par le Service d'Architecture du Système de Défense, ou encore la Direction des Opérations au travers des grands programmes peuvent ensemble amener les armées françaises de demain dans une situation d'autonomie énergétique qui saura leur assurer la suprématie sur les champs de bataille à venir.

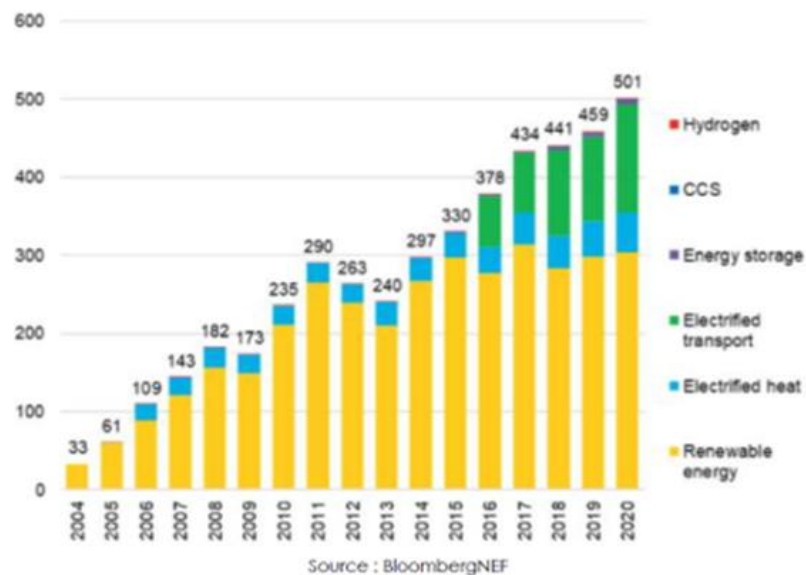


ANNEXES

Annexe 1 : Part mondiale de l'approvisionnement énergétique total par source (2019)

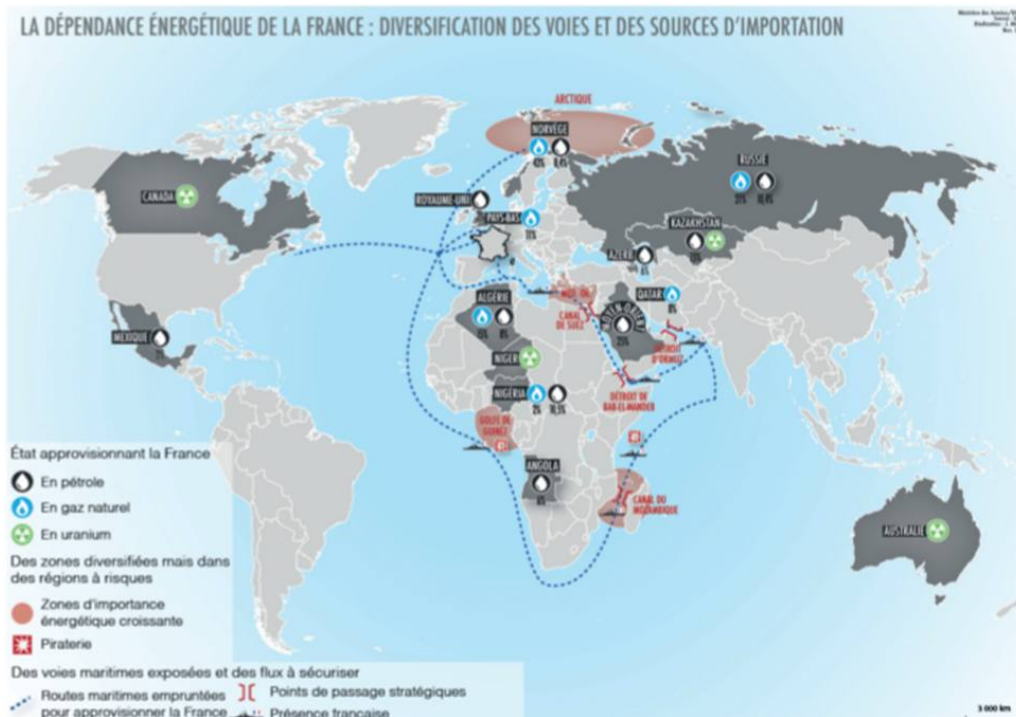


Annexe 2 : Investissement mondiaux dans la transition énergétique (en milliards de dollars)



Source : Bloomberg NEF

Annexe 3 : La dépendance énergétique de la France : Diversification des voies et des sources d'importation



Source : Ministère des Armées, Groupe de travail énergie, « Stratégie Énergétique Défense, 2020, retrieved from <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-36184-strategie-energetique-defense.pdf>, consulté le 06/05/2022

Annexe 4 : Chaîne d'approvisionnement énergétique militaire sur le territoire national

	Domaine d'application	Type d'énergie	Fournisseurs	Transporteurs	Distributeurs	Gestion des stocks	Gestion des infrastructures
Territoire national	Systèmes d'armes	Gazole	Agip, Antar, Avia, BP, Elf, Esso, Total, Irving, Shell	Réseaux de pipelines et d'oléoducs	SEO	SEO	Ø
		Carburants terrestres					
		Carburéacteur					
		Combustible de navigation					
		Autres (huiles, graisses, etc)					
	Infrastructures	Électricité	EDF, Engie, Total OU Autoproduction par les armées (solaire, éolien, bioénergie...)	RTE	ENEDIS	SID	SID en cas d'autoproduction par les armées
		Solaire					
		Nucléaire					
		Éolien					
		Hydraulique		TIGF et GRTGaz	GRDF		Ø
		Thermique à combustible fossile					
		Bioénergies					
		Gaz	Engie				
		Pétrole	Total, BP, Shell	Réseaux de pipelines et d'oléoducs	SEO	SEO	Ø

Source : Fiévet et Santiago, 2021, rapport d'information par la commission de la défense nationale et des forces armées sur les enjeux de transition écologique pour le MINARM, Enregistré à la présidence de l'assemblée nationale le 5 mai 2021

Annexe 5 : Chaîne d'approvisionnement énergétique militaire en opération extérieure

	Domaine d'application	Type d'énergie	Fournisseurs	Transporteurs	Distributeurs	Gestion des stocks	Gestion des infrastructures			
OPEX	Systèmes d'armes	Gazole	Fournisseurs locaux	SEO	SEO	SEO	Ø			
		Carburants terrestres								
		Carburéacteur	Fournisseurs locaux (ressource centralisée dans les aéroports)							
		Combustible de navigation	Fournisseurs locaux							
		Autres (huiles, graisses, etc)								
	Infrastructures	Électricité	Solaire	Fournisseurs locaux ou autoproduction par les armées (solaire, éolien, bioénergie...)	SID	SID	SID	SID en cas d'autoproduction par les armées		
			Nucléaire							
			Éolien							
			Hydraulique							
			Thermique à combustible fossile							
			Bioénergies							
		Gaz	Fournisseurs locaux					SEO		
		Pétrole		Ø						

Source : Fiévet et Santiago, 2021, rapport d'information par la commission de la défense nationale et des forces armées sur les enjeux de transition écologique pour le MINARM, Enregistré à la présidence de l'assemblée nationale le 5 mai 2021

Annexe 6

Libellé de l'essai	Essai ou Étude envisagé	Année de réalisation
BATI	Eco-Camp - Test de différents bâtiments modulaires à Captieux à haute performance énergétique	2019
Protections solaires	Eco-Camp - Étude de filets antichaleur performant	2019
Nouveau système de production	Eco-Camp - Étude d'un nouveau générateur électrique en OPEX – partenariat avec AID	2021
Eco-Camp - Panneaux photovoltaïques et Conditions environnementales	Eco-Camp - Création d'un système de nettoyage de panneaux photovoltaïques	2021
Bâti intelligent	Eco-Camp - Mise en place d'un automate de gestion du bâtiment pour économiser l'énergie	2021
Centrale NG	Eco-Camp - Conception de la nouvelle chaîne d'alimentation en énergie incluant la technologie hydrogène	2021
11- Réseau intelligent	Eco-Camp - Conception d'une architecture électrique intelligente	2022
13 - Camouflage thermique	Eco-Camp - Étude de la couleur des PV et des bâtiments afin de camoufler les équipements dans leur milieu et de diminuer la température de paroi	2022
22-Détection de fuites sur réseau eau	Eco-Camp - Mise en place de data logger pour détecter et localiser les fuites sur les réseaux de distribution d'eau	2022
18- Sanitaires NG	Eco-Camp - Conception d'un module sanitaire BBC eau et élec	2022
20- Traitement d'eau par UV à leds	Eco-Camp - Développement de traitement par UV produits par LED	2023
24 - Camp numérique	Eco-Camp - Plateforme collaborative d'échanges de niveaux stratégique, opératif et tactique – partenariat CSTB envisagé.	2023

Source : Fiévet et Santiago, 2021, rapport d'information par la commission de la défense nationale et des forces armées sur les enjeux de transition écologique pour le MINARM, Enregistré à la présidence de l'assemblée nationale le 5 mai 2021

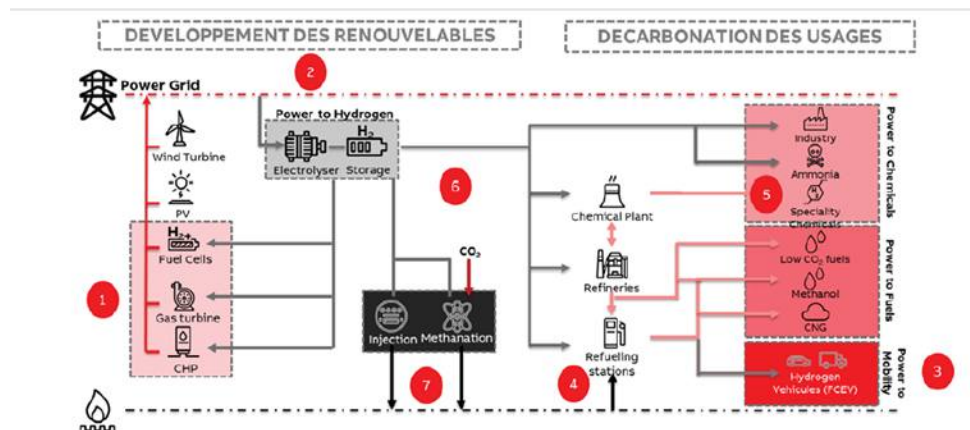
Annexe 7: Comparaison des technologies de piles à combustible

	PEMFC	AFC	MCFC	SOFC
Oxydant	O ₂ /air	O ₂ /air	O ₂ /air	O ₂ /air
Efficacité (%)	50-60	50-60	55-65	55-65
Densité énergétique (kW/m ³)	3,8-6,5	1	1,5-2,6	0,1-1,5
Puissance (kW)	1-250	1-100	1 000-2 000	1-900
Température (°C)	60-200	65-200	600-650	650-1000

Comparaison des technologies de piles à combustible

Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

Annexe 8 : Les différentes applications de l'hydrogène

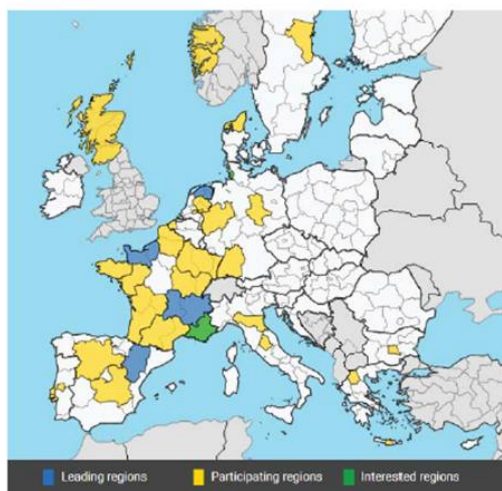


Cas d'usage : Les différentes applications de l'hydrogène

- 1 Electrifier la production d'Hydrogène
- 2 Intégrer l'Hydrogène au réseau électrique
- 3 Développer les véhicules à piles à combustion
- 4 Installer et opérer des stations de recharges
- 5 Hydrogène au service de la chimie et des industries de transformation
- 6 Assurer la logistique complète de l'Hydrogène
- 7 Développer le Power to Gas

Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

Annexe 9 : Cartographie des régions impliquées dans le partenariat Hydrogen Valleys



Source : Commission Européenne, plateforme de spécialisation intelligente

Annexe 10 : Récapitulatif des programmes de soutien de l'UE aux technologies innovantes

Programme	Domaines prioritaires	Types de projets	Budget
Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking	Systèmes de transport de l'hydrogène, systèmes énergétiques et questions transversales	Activités de recherche collaborative, de développement technologique et de démonstration	1,33 milliards d'euros en 2014-2020
Horizon 2020	Horizon 2020 est le programme-cadre de l'UE pour la R&D&I	Recherche et innovation collaborative à tous les niveaux de maturité technologique	80 milliards d'euros en 2014-2020
Connecting Europe Facility	Interconnexions électriques et gazières, réseaux intelligents transfrontaliers, CCUS Infrastructure d'approvisionnement en carburants alternatifs	Études et travaux pour des projets d'intérêt commun dans le domaine de l'énergie et des infrastructures de transport sur les corridors prioritaires	29 milliards d'euros en 2014-2020
Innovation Fund	Industries écono-intensives, CCUS, énergies renouvelables, stockage	Démonstration de technologies innovantes à faible intensité carbone	10 milliards d'euros en 2020-2030

Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

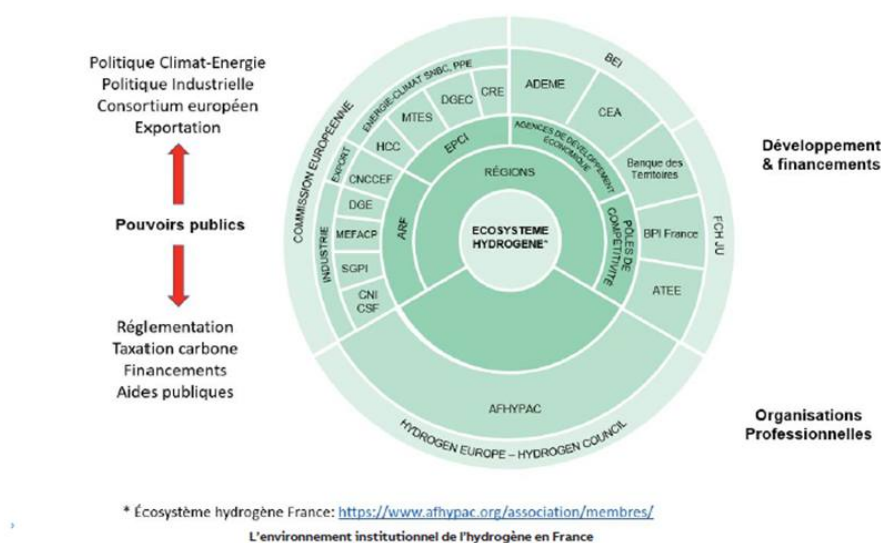
Annexe 11 : Tableau récapitulatif des projets démonstrateurs power-to-gas injection dans le réseau

Projet	Résumé	Pays
GRHYD	Démonstration de mélanges d'hydrogène et de gaz naturel dans des stations de ravitaillement, un parc de 50 bus et dans l'approvisionnement de bâtiments résidentiels	France
JUPITER 1000	Injection jusqu'à 5 % d'hydrogène dans le réseau de transport de gaz	France
NATURALHY	Etude de l'opportunité d'utiliser les infrastructures existantes d'acheminement du gaz naturel pour le transport et la distribution d'hydrogène	Pays-Bas
HYDEPLOY	Démonstration d'un mélange hydrogène-gaz naturel dans un réseau de gaz privé	Royaume-Uni
H21 LEEDS	Analyse de faisabilité de la conversion vers l'hydrogène du réseau de gaz naturel qui alimente la ville de Leeds	Royaume-Uni
HYREADY	Recommandations et bonnes pratiques pour préparer les réseaux de gaz naturel à l'injection d'hydrogène	Dans toute l'Europe

Projets démonstrateurs Power-to-Gas pour injection dans le réseau

Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

Annexe 12 : Ecosystème hydrogène français



Acronymes

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFHY-PAC	Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible
ARF	Association Régions de France
BEI	Banque européenne d'investissement
BPI	Banque publique d'investissement
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CNCCEP	Conseillers du commerce extérieur de la France
CNI	Conseil national de l'industrie
CRE	Commission de régulation de l'énergie
CSF	Comités stratégiques de filière
DGE	Direction générale des Entreprises
DGEC	Direction générale de l'énergie et du Climat
EPCI	Établissement public de coopération intercommunale
FCH-JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
HCC	Haut Conseil pour le climat
MEFACP	Ministère de l'Économie, des Finances, de l'Action et des Comptes publics
MTES	Ministère de la Transition écologique et solidaire
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
SGPI	Secrétariat général pour l'investissement
SNBC	Stratégie nationale bas carbone

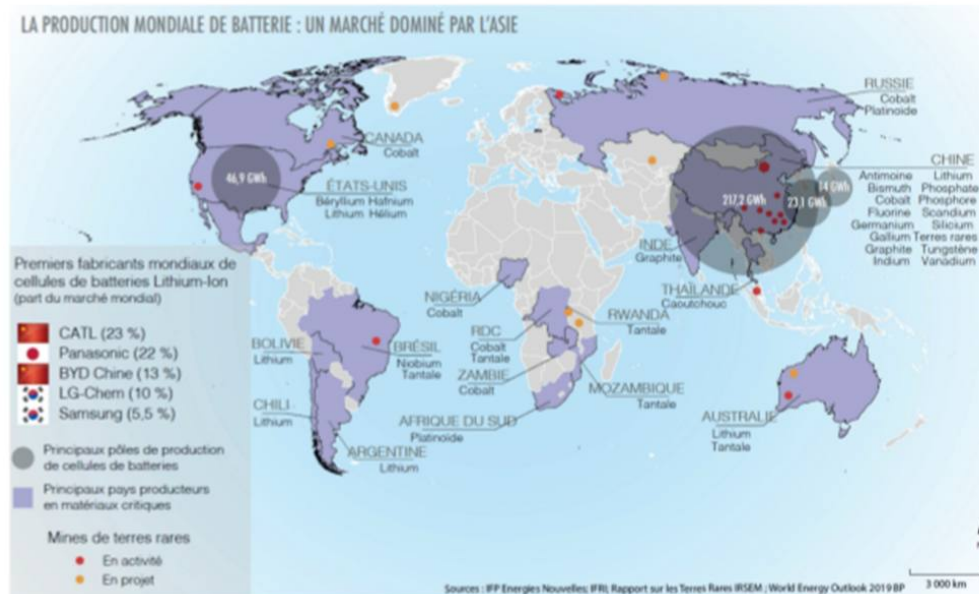
Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

Annexe 13 : Aperçu du cadre réglementaire européen en matière d'hydrogène

Secteur	L'outil législatif de l'UE	Cible	Le rôle de l'hydrogène
Transport	Directive sur les énergies renouvelables II (RED II) Normes d'émission de CO ₂ pour les véhicules utilitaires légers et lourds Directive sur les véhicules propres Directive sur les infrastructures pour les carburants alternatifs	Réduction du CO ₂ , des particules fines, des NOx et des SOx Intégration des énergies renouvelables	H ₂ comme carburant Combustibles à base de H ₂ H ₂ renouvelable dans les raffineries
Industrie	Système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU ETS)	Décarbonisation	L'hydrogène renouvelable/bas carbone comme matière première
Gaz/chauffage	Directive sur les énergies renouvelables II (RED II) (à venir) Règlement sur le gaz	Décarbonisation (GRT-GRD) Intégration des EnR	Hydrogène renouvelable / à faible teneur en carbone comme matière première Pile à combustible comme convertisseur d'énergie
Power	Directive sur les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité Règlement sur le marché intérieur de l'électricité	Stockage / services auxiliaires Intégration des énergies renouvelables	Électrolyseurs à réaction rapide + Intégration sectorielle

Source : ABB, Livre blanc Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone, enjeux et solutions

Annexe 14 : Cartographie de la production mondiale de batteries



Source : Ministère des armées, Groupe de travail énergie du ministère des Armées, Stratégie énergétique de défense, 2020, <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-36184-strategie-energetique-defense.pdf>, consulté le 06/05/2022

REFERENCES

ABB, 2022, « Ecrire le futur de l'hydrogène bas-carbone :enjeux et solutions », Livre Blanc, consulté le 15/07/2022

ACC, site institutionnel, retrieved from <https://www.acc-emotion.com/fr/nos-batteries>, consulté le 15/07/2022

ADEME, 2022, « L'éolien », site institutionnel, retrieved from <https://expertises.ademe.fr/energies/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-lelectricite/leolien>, consulté le 27/05/2022

ADEME, 2022, « L'énergie éolienne terrestre et en mer », site institutionnel, retrieved from https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/2459-energie-eolienne.html#/44-type_de_produit-format_electronique, consulté le 27/05/2022

ADEME, 2022, « Les énergies marines », site institutionnel, retrieved from <https://expertises.ademe.fr/energies/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-lelectricite/energies-marines>, consulté le 27/05/2022

Agence Européenne de Défense (AED), 2022, « New Energy Consultation Forum project to promote low carbon military camps », février 2022, site institutionnel

Autellet Eric, 2022, « Discours d'ouverture de la Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement prononcé par le Général d'armée aérienne Éric Autellet délégué climat auprès du ministère des Armées ».

Amiral Vandier Pierre, 2022, table ronde « Le dérèglement climatique, quels enjeux pour la paix et la sécurité internationale ? », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement

ANDRA, 2019, « La transmutation de déchets radioactifs par laser de haute puissance : le défi de Gérard Mourou », octobre 2019, retrieved from <https://www.andra.fr/la-transmutation-de-dechets-radioactifs-par-laser-de-haute-puissance-le-defi-de-gerard-mourou>, consulté le 31/05/2022

Arnaud Migoux, table ronde « Atteindre la résilience climatique : le rôle des armées, des citoyens et de l'Union Européenne », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement, 15 juin 2022.

Atawey, site institutionnel, retrieved from <http://atawey.com>, consulté le 16/05/2022

Badel Arnaud, 2010, « Superconducting Magnetic Energy Storage Haute Température Critique comme Source Impulsionnelle », Institut National Polytechnique de Grenoble

Bafoil François, 2014, « Les conflits en mer de Chine méridionale », SciencesPo Centre de Recherches Internationales, site institutionnel de SciencesPo, retrieved from <https://www.sciencespo.fr/ceri/fr/content/dossiersduceri/les-conflits-en-mer-de-chine-meridionale>, consulté le 26/07/2022

Blackleaf, site institutionnel, retrieved from <https://www.blackleaf.fr> consulté le 16/05/2022

Bulane, site institutionnel, retrieved from <https://bulane.fr>, consulté le 16/05/2022

Carmichael Yoann, entretien semi-directif, réalisé le 16/07/2022

CEA, 2020, « Bientôt des piles à combustible imprimées ! », retrieved from <https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Medias/Actualites/Vecteur-Hydrogene/bientot-des-piles-a-combustible-imprimees.aspx>, consulté le 18/05/2022

CEA, 2021, « Les SMR », retrieved from <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx?Type=Chapitre&numero=1>, consulté le 18/05/2022

CEA, 2021, « Le stockage stationnaire », site institutionnel, retrieved from <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/recherches-CEA-stockage-stationnaire-energie.aspx>, consulté le 18/05/2022

CEA, 2021, « La mobilité durable », site institutionnel, retrieved from <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energies-renouvelables/recherches-CEA-mobilite-durable.aspx>, consulté le 18/05/2022

CEA, 2022, « L'essentiel sur l'hydrogène », retrieved from <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx>, consulté le 03/05/2022

CEA, « fiche en savoir plus n°1 », site institutionnel, retrieved from <https://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Documents/jeu-de-role-defi-energies/fiches-en-savoir-plus.pdf>, consulté le 16/08/2022

Climeon, Site institutionnel, retrieved from <https://climeon.com>, consulté le 17/05/2022

Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), 2015, « L'essentiel sur...Les générations de réacteurs nucléaires », site institutionnel, retrieved from <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-generations-reacteurs-nucleaires.aspx>, consulté le 23/05/2022

Christian Jacques, entretien semi-directif réalisé le 09/06/2022

Desfourneaux Laurent entretien semi-directif réalisé le 07/06/2022

DOE Hydrogen and Fuel Cells Program, 2019, "Small Business Innovation Research (SBIR) Projects", FY 2019 Annual Progress Report, retrieved from https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress19/sbir_2019.pdf, consulté le 16/05/2022

EDF, « L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale », site institutionnel, retrieved from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-biomasse>, consulté le 27/05/2022

EDF, « Le fonctionnement d'une centrale géothermique », site institutionnel, retrieved from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-geothermique>, consulté le 27/05/2022

EDF, « Les différentes ressources géothermiques », site institutionnel, retrieved from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differentes-ressources-geothermiques>, consulté le 27/05/2022

EDF, « L'énergie géothermique dépend de la chaleur de la Terre », site institutionnel, retrieved from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-geothermie>, consulté le 27/05/2022

Energy.gov, « Hydrogen Delivery », retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery>, consulté le 13/05/2022

Eurostat, "Where does our energy come from ?", retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2a.html?lang=en&lang=en>, consulté le 26/07/2022

Ecole polytechnique, 2021, « Des lasers ultra-puissants pour traiter les déchets nucléaires », Polytechnique Insights, retrieved from <https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/science/des-lasers-ultra-puissants-pour-un-nucleaire-civil-plus-soutenable/>, consulté le 31/05/2022

EDF, « L'usine marémotrice de la Rance », site institutionnel, retrieved from <https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>, consulté le 27/05/2022

Eel energy, site institutionnel, retrieved from <https://www.eel-energy.fr>, consulté le 27/05/2022

European Association for Storage of Energy (EASE) / European Energy Research Alliance (EERA), 2017, "European Energy Storage Technology Development Roadmap", consulté le 13/05/2022

European Energy Research Alliance (EERA), 2019, "Superconducting Magnetic Electricity Storage", site institutionnel, retrieved from https://www.eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=566:EERA_JPES_SP5_Factsheet_final, consulté le 09/05/2022,

Fiévet Jean-Marie et Santiago Isabelle, 2021, « Rapport d'information par la commission de la défense nationale et des forces armées sur les enjeux de la transition écologique pour le ministère des Armées », Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 5 mai 2021, consulté le 04/05/2022

FillnDrive, site institutionnel, retrieved from <https://www.fillndrive.com>, consulté le 16/05/2022

Gauthey Gabriell, 2022, table ronde « Quelle indépendance énergétique pour les armées européennes d'ici 2050 ? », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement

General Secretariat of the Council, 2022, "A Strategic Compass for Security and Defence - For a European Union that protects its citizens, values and interests and contributes to international peace and security", Council of the European Union, 21 Mars 2022

Général (2s) Middendorp Tom, 2022, table ronde « Le dérèglement climatique, quels enjeux pour la paix et la sécurité internationale ? », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement.

George Christine, 2022, entretien semi-directif, réalisé le 29/06/2022

Gomez Julian, 2020, «Des innovations européennes visent à rendre la géothermie plus fiable et plus propre », Euronews, site institutionnel, retrieved from <https://fr.euronews.com/next/2020/08/31/des-innovations-europeennes-visent-a-rendre-la-geothermie-plus-fiable-et-plus-propre>, consulté le 27/05/2022

GIEC, 2013, Glossaire, « Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.

GIEC, 2021, « Climate Change 2021 : The physical Science Basis ».

Haffner Energy, site institutionnel, retrieved from <https://www.haffner-energy.com>, consulté le 16/05/2022

Henriot Stéphane, 2022, entretien semi-directif, réalisé le 23/06/2022.

Helion Energy, site institutionnel, retrieved from <https://www.helionenergy.com>, consulté le 13/05/2022

Helion Hydrogen Power, site institutionnel, retrieved from <https://www.helion-hydrogen-power.alstom.com>, consulté le 26/05/2022

HyLAW, site institutionnel, retrieved from <https://www.hylaw.eu>, consulté le 11/08/2022H2P Systems, « Solar Generators », site institutionnel, retrieved from <https://www.h2psystems.com/news/>, consulté le 09/08/2022

H2Life, « A partir du gaz : vaporeformage », site institutionnel, retrieved from <https://www.h2life.org/fr/hydrogene/sources/vaporeformage>, consulté le 24/05/2022

H2SYS, site institutionnel, retrieved from <https://h2sys.fr>, consulté le 16/05/2022

IFP Energies Nouvelles, « Energie houlomotrice », site institutionnel, retrieved from <https://www.ifpennergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/lenergie-houlomotrice-surfe-vague>, consulté le 27/05/2022

IFP Energies Nouvelles, « Energie thermique des mers », site institutionnel, retrieved from <https://www.ifpennergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/lenergie-houlomotrice-surfe-vague>, consulté le 27/05/2022

IFP Energies Nouvelles, Site institutionnel, <https://www.ifpennergiesnouvelles.fr/ifpen/presentation>, consulté le 21/06/2022

IPCC, 2021, Summary for Policymakers, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32.

IRDEME, 2022, « Bilan quantitatif des modes de production d'énergie électrique », site institutionnel, retrieved from <https://www.irdeme.org/Bilan-quantitatif-des-modes-de-production-d-energie-electrique-1619#titre6>, consulté le 26/05/2022

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Le parc des réacteurs nucléaires français en exploitation : Fonctionnement d'un réacteur nucléaire, site institutionnel de l'IRSN, retrieved from https://www.irsnn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/1-reacteurs-nucleaires-France-Fonctionnement.aspx#.YvpEwTRBy5c, consulté le 18/05/2022

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 2022, Le parc des réacteurs nucléaires français en exploitation, site institutionnel, retrieved from https://www.irsnn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/0-sommaire-parc-reacteurs-nucleaires-France.aspx#.YotZjahBxPY, consulté le 23/05/2022

ITER, « Qu'est ce que la fusion ? », site institutionnel, retrieved from <https://www.iter.org/fr/sci/whatisfusion>, consulté le 23/05/2022

ITER, « ITER, c'est quoi ? », site institutionnel, retrieved from <https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines>, consulté le 23/05/2022

Jeuland Nicolas, 2022, Conférence « La réponse des industriels français des secteurs aéronautique, naval et terrestre à la transition énergétique », Eurosatory

Engie, 2022, « Les e-fuels, une solution d'avenir pour la mobilité verte », site institutionnel, consulté le 04/08/2022

project/, consulté le 27/05/2022

Jimmy, site institutionnel, retrieved from <https://jimmy-energy.eu>, consulté le 23/05/2022

Jupiter 1000, site institutionnel, retrieved from <https://www.jupiter1000.eu/power-to-gas>, consulté le 13/05/2022

Lafitte Jérôme, 2022, table ronde « Quelle indépendance énergétique pour les armées européennes d'ici 2050 ? », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement, 16 juin 2022

Lafitte Jérôme, 2022, entretien semi-directif, réalisé le 15/07/2022

Légras Claire, 2022, « Discours de présentation des objectifs et d'introduction de la Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement prononcé par Claire Légras directrice des affaires juridiques », Ministère des Armées, le 15/06/2022

Lenoir Noëlle, 2022, Discours d'ouverture de la table ronde « Le marché mondial de l'armement à l'heure de la lutte contre le dérèglement climatique », Conférence Européenne sur la Défense et l'Environnement, 16 juin 2022

Liou Johanne, 2021, "What are small modular reactors (SMRs) ?", IAEA, site institutionnel, retrieved from <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>, consulté le 10/05/2022

MEDEF, « L'index des startup et small caps de l'hydrogène », Task Force Hydrogène, retrieved from <https://www.taskforcehydrogene.fr/h40-index-des-startup>, consulté le 16/05/2022

MEDEF, 2022, « Task force hydrogène : annonce des premiers lauréats h40 », site institutionnel du MEDEF, retrieved from <https://www.medefinternational.fr/actions/task-force-hydrogene-annonce-des-premiers-laureats-h40/>, consulté le 16/05/2022

Meunier Sébastien, entretien semi-directif réalisé le 27/06/2022

Ministère des armées, 2020, « Groupe de travail énergie du ministère des Armées », Stratégie énergétique de défense, site institutionnel du Ministère des Armées, retrieved from <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-36184-strategie-energetique-defense.pdf>, consulté le 06/05/2022

Ministère des Armées, Stratégie Climat & Défense, avril 2022

Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2022, « Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France », 2022, site institutionnel, retrieved from <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone>, consulté le 26/05/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2017, « Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, publiée au Journal Officiel du 18 août 2015, et explicitation de ses objectifs par le ministère de la transition énergétique », site institutionnel du ministère, retrieved from <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>, consulté le 27/07/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires et Ministère de la transition énergétique, 2021, Cadre européen énergie-climat, site institutionnel du ministère, retrieved from <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-europeen-energie-climat>, consulté le 28/07/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2021, « L'hydrogène et ses avantages », retrieved from <https://www.ecologie.gouv.fr/lhydrogene-et-avantages>, consulté le 16/05/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2021, « Première réunion du Conseil national de l'hydrogène », site institutionnel, retrieved from <https://www.ecologie.gouv.fr/premiere-reunion-du-conseil-national-lhydrogene>, consulté le 16/05/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2022, Stratégie Nationale Bas-Carbone, site institutionnel du ministère, retrieved from <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>, consulté le 28/07/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2022, »Programme européen de financement LIFE », site institutionnel du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition Energétique, 2022, site institutionnel, <https://www.ecologie.gouv.fr/solaire>, consulté le 26/05/2022

Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires et Ministère de la Transition Energétique, « Biocarburants », site institutionnel, retrieved from https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants#scroll-nav__1, avril 2022, consulté le 04/08/2022

Nations Unies, Recueil des Traités , vol. 1771.

Naarea, Site institutionnel, retrieved from <https://www.naarea.fr> consulté le 18/05/2022

Nawa Technologies, site institutionnel, retrieved from <http://www.nawatechnologies.com> consulté le 18/05/2022

Nicolas Alexandre, 2020, « Note de recherche : Les futures victoires de l'armée de terre seront vertes ! », De « l'écologie de combat » au combat écologique, retrieved from https://www.c-dec.terre.defense.gouv.fr/images/multimedia/photo/une/pep/20220311_NP_CDEC_PEP_NOTE-DE-RECHERCHE-PROSPECTIVE_Combat-ecologique.pdf, consulté le 02/05/2022

Paul Stéphane, entretien semi-directif, réalisé le 29/06/2022

Nunez Christina, 2021, "Micro-nuclear reactors: up to 20MW, portable, safer, energypost", retrieved from <https://energypost.eu/micro-nuclear-reactors-up-to-20mw-portable-safer/>, consulté le 10/05/2022

ONU, « Objectifs de Développement Durable », site institutionnel, retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

OTAN, 2021, « Plan d'action sur le changement climatique et la sécurité », retrieved from https://www.nato.int/cps/fr/natohq/official_texts_185174.htm, consulté le 28/07/2022

Parly Florence, 2021, « Déclaration du 9 septembre 2021 sur la stratégie de préservation de la biodiversité du ministère des armées », Marseille

Tixador Pascal, « Vers une nouvelle Génération de stockage magnétique – Super SMES, ANR », Agence Nationale de Recherche, site institutionnel, retrieved from <https://anr.fr/Projet-ANR-08-STKE-0010>, consulté le 09/05/2022

Préfecture de la manche, 2022, site institutionnel, retrieved from : <https://www.manche.gouv.fr/Politiques-publiques/Amenagement-territoire-energie/Developpement-Durable/La-transition-ecologique>, consulté le 26/07/2022

Quint Aliette, 2022, entretien semi-directif, réalisé le 06/07/2022.

SCK CEN, MYRRHA, site institutionnel, retrieved from <https://www.sckcen.be/fr/nos-projets-scientifiques/myrrha>, consulté le 23/05/2022

Sea 6 Energy, Site institutionnel, retrieved from <https://www.sea6energy.com/offshore-infrastructure> consulté le 17/05/2022

SHYp, site institutionnel, retrieved from, <https://shypbv.com>, consulté le 02/08/2022

Solar Gem, site institutionnel, retrieved from <https://solar-gem.com> consulté le 09/05/2022

Symbio, site institutionnel, retrieved from <https://www.symbio.one/#!>, consulté le 09/06/2022

Sweetch Energy, site institutionnel, retrieved from <https://www.sweetch.energy>, consulté le 27/05/2022

Thoin Bousquié Julie, 2021, « Stellantis "n'a pas l'intention d'investir davantage" dans les moteurs thermiques », L'usine nouvelle, site institutionnel, consulté le 04/07/2022

Tonson Benoit, 2018, « Avec le laser, on peut réduire la radioactivité d'un million d'années à 30 minutes », The Conversation, site institutionnel, retrieved from <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/avec-le-laser-on-peut-reduire-la-radioactivite-d-un-million-d-annees-a-30-minutes-gerard-mourou-prix-nobel-de-physique-792642.html>, consulté le 31/05/2022

United Kingdom Department for Business, 2022 , "Hy4Heat final progress report", Energy and Industrial Strategy, site retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/5b8eae345cfd799896a803f4/t/626aa96961a39b380f82717d/1651157358782/Final+Final+Report.pdf>, consulté le 17/05/2022
Venet Pascal, 2018, « supercondensateurs, technologies et applications », Centrale Lyon, site institutionnel, retrieved from <https://www.centraliens-lyon.net/news/supercondensateurs-technologie-et-applications-5006>, consulté le 02/08/2022

Verkor, site institutionnel, retrieved from <https://verkor.com/ambition/#verkor2>, consulté le 27/06/2022

VHquatrevingtreize, Site institutionnel, retrieved from <https://www.vhquatrevingtreize.com> consulté le 19/05/2022

Vie-publique.fr, 2020, « Sécurité nucléaire : prévention et gestion des risques », site institutionnel, retrieved from <https://www.vie-publique.fr/eclairage/272644-surete-nucleaire-prevention-et-gestion-des-risques#:~:text=Le%20cadre%20réglementaire%20français%20est,nuélaire%20du%20principe%20de%20précaution.>, consulté le 31/05/2022

Vie-publique.fr, 2021, « Nucléaire : comment traiter les déchets radioactifs ? », site institutionnel, retrieved from <https://www.vie-publique.fr/eclairage/18465-nucleaire-comment-traiter-les-dechets-radioactifs>, consulté le 23/05/2022

Vie-publique.fr, 2022, « Le nucléaire civil : quelle part dans l'énergie de demain ? », site institutionnel, retrieved from <https://www.vie-publique.fr/eclairage/283413-le-nucleaire-civil-quelle-part-dans-lenergie-de-demain>, consulté le 23/05/2022

45-8 Energy, site institutionnel, retrieved from <http://458energy.com>, consulté le 16/05/2022

