

## Prospective

# L'ÉNERGIE AU ROYAUME-UNI À L'HORIZON 2050: RÉFLEXIONS SUR LA PRÉVENTION

Les activités de veille et de prospective sont des outils contribuant à élaborer des « visions du futur » dans le monde du travail, visions qui contribuent à anticiper les besoins en prévention. Des activités de prospective sont également pratiquées à l'étranger sur des sujets variés. Analyser leurs résultats est intéressant, dans la mesure où il est admis que la qualité de la prospective est liée à la variété des acteurs qui y contribuent. Les différences liées aux contextes ou aux cultures dans les différents pays sont également riches en enseignements. Le présent article résume un exercice de prospective sur l'énergie pratiqué au Royaume-Uni, pays qui présente des similitudes avec la France, mais aussi des différences quant au mix énergétique.

*ENERGY IN THE UNITED KINGDOM BY 2050. THOUGHTS ON PREVENTION, The watch and foresight activities are tools contributing to the development of "visions of the future" in the world of work, visions that help to anticipate prevention needs. Foresight activities are also practiced abroad on various subjects. Analyzing their results is interesting, insofar as it is accepted that the quality of foresight is linked to the variety of actors that contribute to it. Differences in contexts or cultures in different countries are also rich in lessons. This article summarizes a prospective exercise on energy in the United Kingdom, a country with similarities to France, but also differences in the energy mix.*

RÉSUMÉ  
PAR LOUIS  
LAURENT  
direction des  
Études et  
recherches,  
INRS

**A**vec sa loi sur le changement climatique de 2008 (le « *Climate Change Act* »), le Royaume-Uni s'est engagé dans une réduction drastique de ses émissions de gaz à effets de serre à l'horizon 2050. L'objectif fixé est une réduction de 80% des rejets de gaz carbonique par rapport au niveau de 1990<sup>1</sup>, ce qui se traduit par l'utilisation massive d'énergies décarbonées et par le déploiement de nouveaux procédés de stockage de l'énergie et de gestion des réseaux de distribution d'énergie. Le centre de prospective de HSE<sup>2</sup>, l'agence britannique pour la santé et la sécurité au travail, a récemment publié un rapport de prospective qui traite de ces évolutions et de leur impact en matière de santé sécurité au travail [1]. Les auteurs soulignent que cet exercice a pour but, non pas de prévoir l'avenir, mais de susciter en amont la réflexion sur la prévention des risques. Le cœur de ce document est une série de sept courts articles, chacun d'entre eux étant découpé en une section alimentée par l'activité de veille du

centre de prospective et décrivant les tendances et un encadré détaillant ce que cela peut signifier pour le travailleur. Les deux premiers articles portent sur des secteurs d'activités très gourmands en énergie, le transport et le chauffage, qui sont respectivement responsables de 34% et 17% des rejets de CO<sub>2</sub> britanniques [2]. Les quatre suivants traitent de technologies ou de procédés appelés à se généraliser, et le dernier discute du démantèlement, activité qui a de beaux jours devant elle. Ce rapport se termine par une conclusion générale sur les évolutions prévisibles en santé et sécurité au travail.

### Deux secteurs fortement impactés

#### Production de chaleur

La production de chaleur représente au Royaume-Uni 50% de la consommation d'énergie. Une partie significative de cette chaleur est produite à partir du gaz, ce qui génère une quantité importante de gaz carbonique. Les évolutions mentionnées dans cet article sont de trois types.



© Julien Pécaud pour l'INRS

- Tout d'abord, la généralisation de l'isolation des bâtiments pour diminuer la consommation. En termes de sécurité et santé au travail, les points d'attention sont l'exposition des travailleurs lors de travaux d'isolation, soit à des fibres minérales (y compris l'amiante dans les anciens bâtiments) soit à des fibres «vertes», qui présentent des risques spécifiques : infectieux, allergiques.
- Des changements dans la manière de produire de la chaleur. On tendrait à limiter l'usage du gaz naturel au profit de l'électricité *via* le déploiement de pompes à chaleur électriques ou hybrides<sup>3</sup>. Une autre piste est la combustion du biogaz produit à court terme par la digestion anaérobie des déchets et, à moyen terme, par d'autres techniques jugées plus avantageuses, comme la pyrolyse. Les auteurs mentionnent les risques associés à certains de ces procédés «avancés» qui génèrent du monoxyde de carbone. Pour le plus long terme, on mentionne des ruptures possibles avec l'usage de l'hydrogène, ou... le retour du gaz, si des techniques de séquestration du

carbone permettent de décarboner la chaleur ainsi produite.

- Des évolutions du réseau de distribution de chaleur. Le déploiement de réseaux de chaleur urbains pourrait être favorisé, dans la mesure où des chaudières centralisées peuvent plus facilement consommer des combustibles durables (déchets, biomasse). Pour le plus long terme, un scénario décentralisé est évoqué, avec un réseau qui connecte des millions de consommateurs/producteurs d'énergie. Dans tous les cas, ces nouveaux types de réseau vont multiplier les acteurs concernés et, en cas de mauvaise communication, amplifier les risques pour les personnes qui interviennent dessus.

### Transports

L'enjeu est de diminuer significativement la part des hydrocarbures liquides, car ce sont eux qui génèrent le plus de gaz carbonique, avec trois types d'évolution :

- Le passage au gaz naturel (ou mieux encore au



biogaz, ce dernier étant neutre en carbone). Le gaz doit être stocké sous pression ou liquide, à très basse température.

- La montée en puissance de l'électricité, qui peut être soit stockée dans une batterie (lithium-ion ou d'autres types en cours de développement) ,soit produite à partir d'une pile à combustible qui consomme de l'éthanol ou de l'hydrogène. Le passage à l'électricité influera sur les comportements. Par exemple, l'usage massif de batteries demanderait une programmation intelligente des recharges pour ne pas saturer le réseau.
- La modification des modes de consommation, comme la montée en puissance du partage de véhicules.

Les risques associés à l'évolution de la source d'énergie dans les véhicules sont soit liés à l'explosion (du carburant ou de la batterie), soit liés à la manipulation de fluides cryogéniques, ou des risques électriques, les tensions des batteries pouvant atteindre des centaines de volts. Les auteurs soulignent particulièrement le fait que ces technologies vont évoluer au cours des années, ce qui demande une vigilance particulière. Ces risques interviennent à toutes les étapes de la vie du véhicule, y compris le recyclage. Ils concernent également les secours qui interviennent lors d'un accident et peuvent se trouver confrontés à divers types de stockage d'énergie, éventuellement endommagés.

#### Quatre technologies en fort développement

##### Stockage électrique d'énergie

L'un des facteurs clés pour l'intégration du solaire et de l'éolien dans la production d'énergie est le développement du stockage de l'énergie. On estime qu'il faudra disposer en 2040, pour le Royaume-Uni, de capacités de stockage de 18 GWh<sup>4</sup> pour lisser la production d'énergie. Parmi les différentes technologies (volant d'inertie, air comprimé, thermique, pompage d'eau en hauteur, batterie), c'est le déploiement de batteries qui est actuellement jugé par les entreprises comme le plus intéressant. On s'attend dans ce secteur à des évolutions significatives :

- L'apparition de nouvelles technologies des batteries, qu'on peut deviner à travers les activités de recherche, par exemple de nouveaux types de batteries à forte capacité (comme les batteries dites «à flux redox», des stockages de charge dans des composés organiques comme l'ion pyridinium). À plus long terme, de nouvelles technologies de stockage pourraient émerger comme le stockage mécanique, à partir de gaz comprimé ou thermique dans du silicium fondu, voire le stockage chimique direct de la lumière solaire<sup>5</sup>.
- De nouveaux usages des batteries. La baisse de leur coût mènera à la multiplication de stockages

d'énergie répartis dans le réseau, mais aussi chez les particuliers, qui pourraient offrir leurs capacités de stockage au réseau. Cet ensemble sera géré par un réseau intelligent, capable à tout moment d'équilibre entre production et demande.

- Le recyclage des batteries. Actuellement, 5% des batteries lithium-ion sont recyclées en Europe. La situation va évoluer vers des pratiques plus poussées de recyclage, de réutilisation par exemple, en offrant une seconde vie à des batteries de voiture pour des stockages domestiques, du développement de nouvelles technologies moins gourmandes en matière première et adaptées au recyclage.

On retrouve dans ce domaine les risques classiques d'explosion, chimiques, électriques liés à des batteries, à ceci près qu'il pourra s'agir d'installations de plus forte capacité qu'actuellement. Ils sont à prendre en compte dans un contexte de probable prolifération de technologies. Il pourra être difficile de fournir l'information aux personnes chargées d'installer ces dispositifs, d'en assurer la maintenance ou de les recycler. Des risques inédits seront à traiter comme les conséquences de la défaillance d'un important stockage local sur le réseau électrique.

##### L'hydrogène

En théorie, l'hydrogène est un excellent vecteur d'énergie, qu'il soit utilisé directement ou au préalable transformé en énergie électrique dans une pile à combustible. Parmi les développements considérés :

- L'enrichissement en hydrogène du gaz naturel distribué dans les réseaux pour diminuer le gaz carbonique produit par le chauffage. On envisage ainsi de monter la concentration en hydrogène autorisée dans le gaz jusqu'à 10%, sans que cela ait un impact significatif. Pour aller au-delà, voire transporter de l'hydrogène pur, cela demanderait de modifier une partie des réseaux en ajoutant un revêtement intérieur dans les tubes en acier. Ces travaux sont en cours et devraient être achevés en 2032. Passer à des mélanges très enrichis en hydrogène demanderait également de revoir les brûleurs adaptés uniquement au gaz et de déployer un nouveau type d'instrumentation comme des compteurs ou des détecteurs. Quoiqu'il en soit, il n'a pas été démontré que le tout hydrogène était viable économiquement.
- L'hydrogène peut également être considéré comme un moyen de stocker de l'énergie : lorsqu'il y a un surplus d'énergie solaire ou éolienne, l'excédent d'électricité servant à électrolyser de l'eau. Des stockages d'hydrogène dans des cavernes souterraines de sel<sup>6</sup> ont déjà été testés et ils pourraient être suffisants à



l'échelle de la saison. L'excédent de l'été serait en hiver, soit converti en électricité, soit distribué comme combustible.

- L'hydrogène est produit principalement à partir de l'électrolyse de l'eau ou par reformage du méthane<sup>7</sup>. Le bilan de l'usage de l'hydrogène en termes de gaz à effet de serre dépend du procédé, par exemple l'origine de l'électricité s'il s'agit d'électrolyse, ou la capacité à capturer et stocker le gaz carbonique dans le cas du reformage. Les auteurs estiment que les électrolyseurs deviennent à long terme la solution la plus intéressante économiquement.

En termes de risque, c'est le risque d'explosion qui doit être pris en compte, la gamme de concentration où une explosion est possible étant relativement large. Toutefois, un feu d'hydrogène est peu visible et rayonne sensiblement moins d'énergie qu'un feu d'hydrocarbure, ce qui est un point négatif quand il s'agit de le détecter et positif car il chauffe moins son environnement. Les auteurs évoquent une modification de l'hydrogène pour colorer sa flamme et l'ajout d'additifs odorants, pour rendre les fuites détectables. Autres risques, l'asphyxie et les basses températures en cas de manipulations de fluides cryogéniques. Des formations spécifiques seraient nécessaires pour tous ceux qui interviennent sur des dispositifs à hydrogène.

### Réseaux intelligents

Le passage aux énergies décarbonées aura des répercussions fortes sur le réseau, compte tenu du caractère très décentralisé de la production



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS

#### ENCADRÉ 1

#### QUELLES CONCLUSIONS POUR LE CAS FRANÇAIS ?

En France, la « loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte » de 2015 fixe comme objectif de réduire de 75 % les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050<sup>1</sup> [5]. Il est notamment prévu de réduire de moitié la consommation énergétique finale des français entre 2012 et 2050 et que, dans cette production résiduelle de 2050, 32 % soit issue des renouvelables. En 2025, la part du nucléaire dans la production d'électricité française est réduite à 50% (contre environ 70% en 2017). Il existe des différences significatives dans les sources d'électricité françaises et britanniques actuelles et projetées en 2050, notamment sur le nucléaire et l'éolien, qui impactent les

approches de ces deux pays. Ainsi, au Royaume-Uni, début 2018 la part de production d'électricité éolienne a été très légèrement supérieure à celle d'électricité nucléaire (environ 19 %), le gaz restant toutefois le principal contributeur (40%). Toutefois, une bonne partie des questionnements mentionnés dans le rapport de prospective du HSE sont d'actualité en France, par exemple la question du stockage d'énergie pour les transports ou pour absorber les pointes de consommation électrique, et les réseaux dits « intelligents », capables de s'adapter à une production beaucoup plus décentralisée et à un parc d'automobiles électriques

conséquent. De même, les secteurs du bâtiment et des transports font l'objet d'une attention particulière de part et d'autre de la Manche. Les conclusions du rapport britannique quant à la prévention sont tout à fait d'actualité en France : la prise en compte de la complexité des réseaux et des organisations associées, l'apparition de nouveaux acteurs dans le secteur de l'énergie, pas nécessairement familiers des risques et, probablement, la coexistence de systèmes de stockage d'énergie fondés sur des procédés différents, pour lesquels la mise à jour des évaluations de risque sera permanente.

1. Elles étaient de 401 millions de tonnes en 1990.



## ENCADRÉ 2 LE HSE [3, 4]

Le HSE (*Health and Safety Executive*, en Français l'agence pour la santé et la sécurité au travail) est un établissement public britannique indépendant, qui emploie environ 2 500 personnes. Créé en 1974, il est sous la tutelle du département du gouvernement britannique en charge du travail et des retraites. Ses missions sont :

- Établir des normes et proposer des réglementations au secrétaire d'État en matière de santé et de sécurité au travail.
- Faire respecter la réglementation y compris via des inspections.
- Réaliser des recherches en interne et aussi encourager des recherches externes.
- Mener des activités d'information et de conseil auprès des entreprises.

• Informer et conseiller le ministre à sa demande.

Dans son document stratégique de 2016 intitulé « aider la Grande Bretagne à bien travailler », HSE met en avant six priorités :

- Améliorer l'appropriation par les acteurs des questions de santé et de sécurité.
- Simplifier la gestion des risques et contribuer au développement économique.
- Réduire les coûts des accidents du travail et des maladies professionnelles.
- Avoir des actions adaptées aux PME.
- Anticiper et relever les nouveaux défis en matière de santé et de sécurité.
- Promouvoir les avantages du système de santé et de sécurité de classe mondiale de la Grande-Bretagne.

C'est dans le cadre de cette cinquième priorité, « Anticiper et relever les nouveaux défis » que le centre de prospective du HSE fournit depuis 2016 un rapport par an. Celui sur l'énergie est le second, le premier portant sur les technologies de l'information.

d'énergie, de l'intermittence de la fourniture d'électricité solaire ou éolienne, de l'existence de forts pics de demande. Parmi les évolutions :

- La mise en réseau de tous les véhicules électriques en stationnement, de telle sorte qu'ils puissent être rechargés aux moments optimum, mais également servir de source d'appoint en cas de pénurie d'électricité<sup>8</sup>.
- Des systèmes de gestion intelligents, mais aussi plus interconnectés, prenant en compte la demande (par exemple, un système incitatif pour décaler la demande en période d'excédent, des objets connectés pour optimiser la consommation), la production décentralisée au niveau national, les capacités de stockage.
- De nouveaux modèles économiques. La consommation d'énergie serait couplée à un dispositif (par exemple, une voiture) pour constituer un service global comme c'est le cas avec les abonnements téléphoniques, qui lient téléphone et accès au réseau.

La complexité des réseaux peut accroître les risques d'électrocution, par exemple à l'occasion de la connexion de nouvelles sources d'énergie. Il faut également compter avec les risques de cyberattaques, qui peuvent modifier l'état du réseau pendant une opération de maintenance. De même, la localisation très diverse de tous ces dispositifs (travail en hauteur ou, au contraire, dans une excavation) génère des risques.

### Développement de l'éolien off-shore

Le Royaume-Uni dispose de trente fermes éoliennes *off-shore*, avec une puissance installée de 5,1 GW, qui fournissent 5% de la demande annuelle en électricité, part qui devrait doubler en 2020. L'énergie éolienne britannique est devenue moins chère que le nucléaire. Parmi les évolutions discutées :

- Des développements techniques pour baisser les coûts et augmenter la fiabilité de l'énergie éolienne. On prédit une augmentation de la puissance unitaire des éoliennes, sachant que certaines ont déjà des pylônes qui atteignent 220 mètres de haut et des turbines de 8 MW. En parallèle, on envisage de nouveaux types de géométrie d'éoliennes, à deux pales, voire sans pales, ainsi que le recours à de nouveaux matériaux à base de carbone et à l'impression 3D de pales.
- Enfin, on développe des moyens de diagnostic et de maintenance aériens et sous-marins adaptés comme les drones ou des solutions robotisées.
- Des composants électroniques de puissance, nécessaires pour coupler l'énergie produite par les éoliennes au réseau électrique (cela nécessite une conversion de fréquence).
- Une plus large répartition géographique de la production d'énergie avec le développement de fermes éoliennes capables de fonctionner très au large.

En termes de risques, une partie de ceux-ci sont déjà connus : travail en hauteur, espaces confinés, risque électrique, météo. Certains peuvent être amplifiés avec le gigantisme des installations. Des risques spécifiques sont notés, comme la pression sur l'exploitant pour réparer rapidement en profitant d'une fenêtre météo, la coactivité d'entreprises multiples éventuellement de nationalités différentes. À ceci, il faut ajouter que l'éolien est en expansion rapide, ce qui risque de générer une pénurie de main d'œuvre qualifiée.

### Activités connexes

#### Démantèlement

Ce sujet est susceptible de prendre de l'importance pour des raisons multiples : usure, obsolescence des technologies, évolution qui nuit à la rentabilité du dispositif, fin d'un contrat de licence, considé-

rations environnementales qui font que ce secteur pourrait être fortement subventionné. Parmi les installations qui seront à l'origine d'une forte activité de démantèlement :

- Neuf centrales à charbon qui seront fermées au plus tard en 2025, voire plus tôt.
- Des forages *off-shore* en mer du Nord. Il existe environ 1 500 installations d'un âge moyen de 25 ans, dont certaines sont de taille considérable (des centaines de milliers de tonnes) et demanderont 20 ans de travail pour être démantelées. En termes de risque, les chantiers de démantèlement des installations liées à l'industrie pétrolière sont d'une taille sans précédent et on manquera de travailleurs expérimentés.
- Des éoliennes. L'éolien est en plein essor. La durée de vie des éoliennes étant estimée à 20-25 ans, une forte activité de démantèlement est à prévoir. Il subsiste des interrogations quant au coût de ces opérations, qui pourraient être plus chères que la construction et au recyclage des terres rares et aux matériaux composites des pales. Les risques sont proches de ceux de la construction, avec une aggravation du fait du possible endommagement de certaines structures.
- Les générateurs photovoltaïques. Les générateurs solaires durent une trentaine d'années et se posera à terme la question de leur démantèlement, avec une grande variété de cas, du petit générateur d'un particulier aux grosses installations centralisées. Le démantèlement des nombreuses petites installations solaires sera en bonne partie confié à des PME/TPE qui seront confrontées à des risques variés : travail en hauteur composés toxiques, risque électrique.
- Le démantèlement des réacteurs nucléaires avec, à chaque fois, la même séquence d'opérations : évacuation du combustible, évacuation des structures activées, démolition.

## Conclusion

Ces quelques articles laissent prévoir un bouleversement important des activités dans le secteur de l'énergie au Royaume-Uni. Les auteurs soulignent un certain nombre de points à prendre en compte, au-delà des risques propres à chaque sujet :

- **Sur le niveau d'expérience des intervenants.** Le secteur de l'énergie se développe rapidement. Cela va entraîner une pénurie de travailleurs expérimentés mais aussi l'entrée de nouveaux acteurs qui devront très vite développer une culture de sécurité.
- **La complexité.** Des installations d'une complexité croissante, en particulier les réseaux, génèrent des risques de non-maîtrise, avec l'apparition d'effets dominos où un incident mineur peut entraîner des conséquences multiples. Cette

complexité technique ira de pair avec une plus grande complexité organisationnelle, avec une intrication plus forte d'acteurs variés.

- **La difficulté de mise à jour des évaluations de risques.** Des évolutions rapides des technologies et des installations qui nécessitent une mise à jour permanente des évaluations de risque.
- **Des nouveaux risques pour tous les métiers.** Le réseau du futur pourrait être moins stable que l'actuel avec des coupures liées à des déséquilibres entre l'offre et la demande, coupures qui peuvent générer des risques multiples, tous métiers confondus. ●

1. Soit 601 millions de tonnes, selon les statistiques de l'OCDE.
2. Initiales de "Health and Safety Executive".
3. Mixtes électrique et gaz. L'avantage du système hybride est que la pompe à chaleur fonctionne même en cas de pénurie d'électricité.
4. Pour fixer les idées, on stocke environ 150 Wh par kilogramme de batterie.
5. L'exemple du norbornadiène est cité. Éclairée par de la lumière solaire, cette molécule se convertit en un isomère, le quadricyclane qui peut revenir à sa forme initiale en restituant l'énergie absorbée sous forme de chaleur.
6. Ces cavernes sont utilisées pour stocker du gaz naturel et certaines pourraient aussi stocker de l'hydrogène.
7. Le méthane réagit à haute température avec de l'eau, ce qui produit de l'hydrogène et du gaz carbonique.
8. L'utilisation en appoint de 10 % de la capacité d'un million de batteries de voitures, stockant chacune 80 kWh, représente un stockage de 8 GWh.

---

## BIBLIOGRAPHIE

[1] HSE Foresight Annual Report 2017/18.

Voir : <http://www.hse.gov.uk/horizons/assets/documents/foresight-report-2017.pdf>

[2] RAPPORT du département de l'économie, de l'énergie et de la stratégie industrielle du gouvernement britannique « 2017 UK Greenhouse emission, provisional figures ».

Voir : [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/695930/2017\\_Provisional\\_Emissions\\_statistics\\_2.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/695930/2017_Provisional_Emissions_statistics_2.pdf)

[3] CONTRAT CADRE entre HSE et le Département du travail et des retraites de janvier 2016. Voir : [http://data.parliament.uk/DepositedPapers/Files/DEP2016-0071/DWP\\_HSE\\_FRAMEWORK\\_DOCUMENT\\_2016.pdf](http://data.parliament.uk/DepositedPapers/Files/DEP2016-0071/DWP_HSE_FRAMEWORK_DOCUMENT_2016.pdf)

[4] HSE - Stratégie « Aider la Grande-Bretagne à bien travailler ».

Voir : <http://www.hse.gov.uk/strategy/strategy-document.htm>

[5] Loi de transition énergétique pour la croissance verte, n° 2015-992 du 17/08/2015.

Accessible sur : [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)