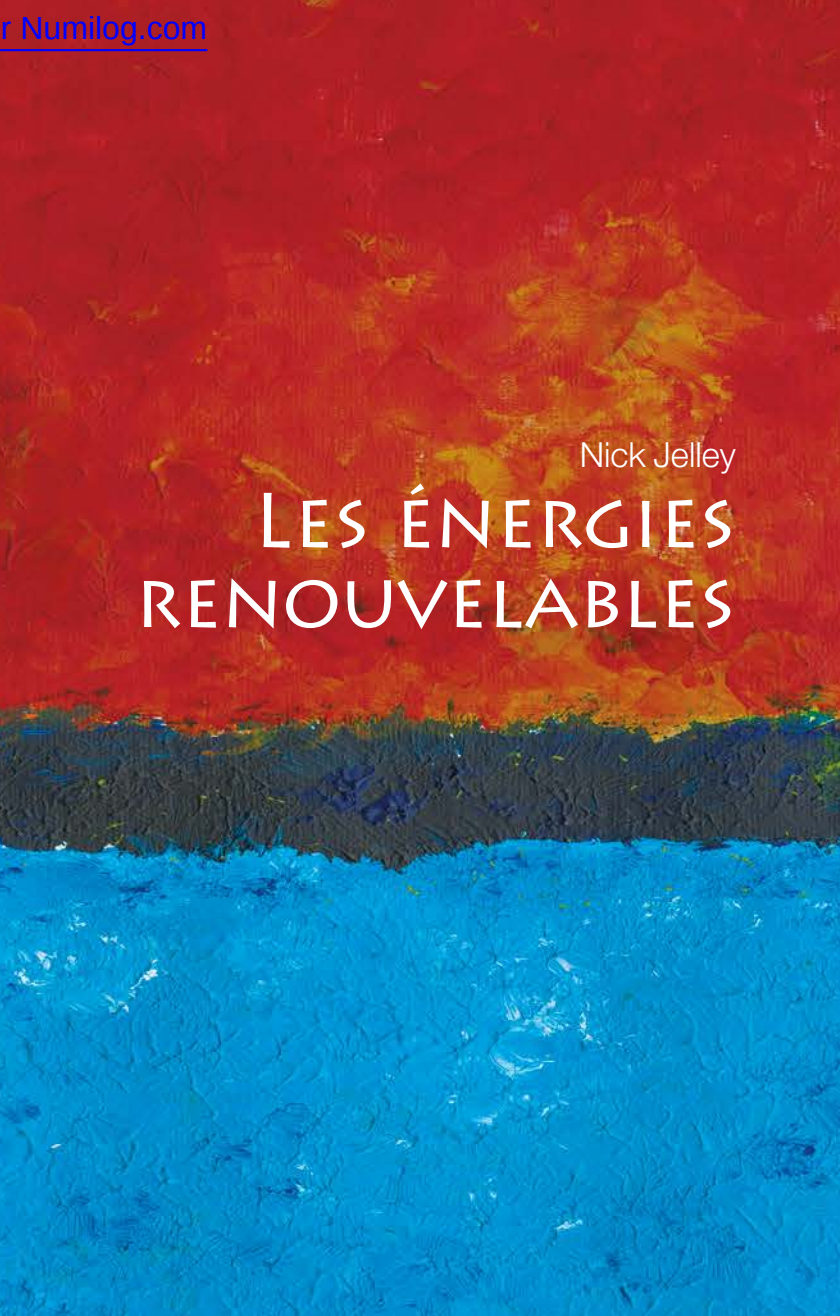


Nick Jelley

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES



Nick Jelley

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Dans le monde d'aujourd'hui, l'énergie est nécessaire pour garantir un bon niveau de vie. Il est donc essentiel de disposer de sources d'énergie abordables qui n'entraînent ni pollution ni changement climatique. Pour Nick Jelley, les énergies renouvelables sont la solution, il estime qu'il est désormais temps de passer des combustibles fossiles à ce type d'énergies.

Ce livre détaille les principales sources d'énergie renouvelables – solaire, éolienne, hydroélectrique et biomasse – ainsi que celles qui sont moins développées – géothermie, marée et vagues. L'auteur expose les défis que représentent l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, la nécessité du stockage de l'énergie, et examine les efforts internationaux visant à soutenir les énergies renouvelables. Il détaille aussi les récentes innovations en matière de production d'énergie éolienne et solaire, de stockage et de conversion de l'électricité en gaz pour le chauffage propre.

Nick Jelley est professeur émérite au département de physique à l'Université d'Oxford. Il a reçu deux prix de l'Institute of Physics, et mène depuis quelques années des recherches sur l'énergie solaire dans les pays du Sud.

Les énergies renouvelables

[Retrouver ce titre sur Numilog.com](http://Numilog.com)



Les énergies renouvelables

Nick Jelley

Traduit de l'anglais par Alan Rodney

ChronoSciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir de façon très complète mais de manière abordable un sujet ou une thématique précise.

« Dans la même collection »

L'Intelligence artificielle, Margaret A. Boden, mai 2021

La Théorie quantique, John Polkinghorne, mai 2021

Les Marées, David George Bowers et Emyr Martyn Roberts, juin 2021

L'Anthropocène, Erle C. Ellis, octobre 2021

L'Odorat, Matthew Cobb, novembre 2021

Le Changement climatique, mars 2022

Renewable energy: a very short introduction, first edition was originally published in English in 2020. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. [*Les Énergies renouvelables* a été initialement publiée en anglais en 2020. Cette traduction est publiée avec l'autorisation d'Oxford University Press.]

© Nick Jelley 2020

© Pour la traduction française, EDP sciences, 2022.

Composition et mise en page : Desk (www.desk53.com.fr)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2690-2

Ebook : 978-2-7598-2691-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.



Sommaire

Remerciements	7
1. Qu'est-ce qu'on entend par les énergies « renouvelables » ?	9
2. Pourquoi avons-nous besoin des renouvelables ?	27
3. La biomasse, la chaleur solaire et l'énergie hydraulique	45
4. L'énergie éolienne	65
5. Le photovoltaïque solaire	81
6. Autres technologies bas-carbone	101
7. L'électricité renouvelable et le stockage de l'énergie	119
8. La chaleur décarbonée et les transports	137
9. La transition vers les « renouvelables »	151
Lectures complémentaires	167
Index	169

[Retrouver ce titre sur Numilog.com](http://Numilog.com)



Remerciements

Je remercie infiniment les personnes suivantes pour les discussions que nous avons eues sur les énergies renouvelables : John Andrews, Conyers Davis et leurs collègues de l'Institut Schwarzenegger de Los Angeles, Nick Eyre, Chris Goodall, Mike Mason Goodall, Mike Mason, Moritz Riede, Gerard van Bussel, et Simon Watson. Je tiens également à remercier Latha Menon pour ses conseils, et tout les membres du personnel d'Oxford University Press qui ont aidé à préparer le manuscrit pour la publication.

Mais par-dessus tout, j'aimerais remercier ici ma femme Jane, dont le soutien et les commentaires ont été inestimables, ainsi que John, Tessa et Piernicola pour leurs encouragements.

[Retrouver ce titre sur Numilog.com](http://Numilog.com)

1

Qu'est-ce qu'on entend par les énergies « renouvelables » ?

Nous consommons de l'énergie tout le temps dans notre vie quotidienne : lorsque nous passons un appel sur notre téléphone portable, faisons bouillir de l'eau ou conduisons une voiture. L'énergie est vitale pour une bonne qualité de vie : elle permet de se chauffer, de produire de la nourriture et d'alimenter les technologies. Au cours des 200 dernières années, nous nous sommes de plus en plus appuyés sur les combustibles fossiles. Or la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel pour fournir de l'énergie rejette d'énormes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère et produit également des polluants nocifs pour notre santé et pour l'environnement. Il serait facile de continuer comme par le passé, et les gisements de combustibles fossiles sont suffisants pour durer encore plusieurs centaines d'années. Mais le niveau de dioxyde de carbone dans l'atmosphère – qui a déjà commencé à perturber sérieusement notre climat – provoquerait un changement climatique dangereux avant la fin de ce siècle en raison du réchauffement de la planète, et mettrait en danger plusieurs millions de vies. Et à l'heure actuelle, nous constatons que la pollution atmosphérique provoque déjà sept millions de décès prématurés chaque année.

L'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Heureusement, une partie de l'énergie que nous utilisons n'a pas ces conséquences néfastes, en particulier l'énergie générée par le

solaire, l'éolien et l'hydroélectricité. Dans de nombreuses régions du monde, les générateurs solaires et éoliens sont en passe de devenir la source d'énergie la moins chère, et une alternative viable aux combustibles fossiles. De plus, ces sources d'énergie sont renouvelables, car elles se reconstituent naturellement en quelques jours ou décennies. Lorsque l'énergie produite est abordable et que sa production ne nuit pas à l'environnement ou aux personnes (comme cela peut se produire, par exemple, lorsque des forêts sont abattues pour des plantations de bioénergie), l'approvisionnement en énergie renouvelable est durable. Cette énergie durable pourrait offrir de nombreux avantages immédiats. Elle pourrait réduire la pollution atmosphérique qui sévit aujourd'hui dans de nombreuses villes, fournir une énergie moins chère et de nombreux nouveaux emplois, et assurer la sécurité énergétique de millions de personnes à un coût abordable.

Il y a seulement quelques années, il aurait été très difficile de renoncer à notre dépendance à l'égard des combustibles fossiles pour lutter contre le réchauffement de la planète, car ils sont bien ancrés dans notre société et toute alternative se serait avérée très coûteuse. De plus, comme le changement climatique semblait n'être qu'une menace progressive et lointaine, qui ne suscitait pas de réaction émotionnelle et d'action immédiate, de nombreux individus et gouvernements étaient réticents à agir. Mais aujourd'hui, la menace est beaucoup plus proche et il est devenu essentiel de passer des combustibles fossiles aux énergies renouvelables.

Le Soleil est notre principale source d'énergie renouvelable. Son rayonnement fournit de la lumière pour s'éclairer, de la chaleur pour se chauffer et cuisiner, et peut également être converti en électricité par des cellules photovoltaïques. Les variations de son absorption à la surface de la Terre génèrent des différences de températures de surface qui provoquent des vents, lesquels peuvent être utilisés pour actionner des éoliennes. Les rivières sont notre source d'énergie hydroélectrique et font partie du cycle naturel dans lequel les précipitations provenant

des nuages s'écoulent vers la mer *via* les rivières, et l'évaporation de l'eau dans l'atmosphère par le réchauffement solaire donne naissance aux nuages. Les plantes tirent leur énergie de la photosynthèse, au cours de laquelle le dioxyde de carbone et l'eau sont convertis en hydrates de carbone en présence de la lumière du soleil, et sont utilisés pour fournir de la nourriture, ainsi que des combustibles pour le chauffage et les moteurs. Les ressources éoliennes et solaires ont chacune le potentiel de fournir toute l'énergie dont le monde a besoin, et cela plusieurs fois.

LES SOURCES ANCIENNES D'ÉNERGIE

Jusqu'au XVIII^e siècle, la quasi-totalité des sources d'énergie provenaient de sources renouvelables. Les plantes et les animaux fournissaient de la nourriture et des matériaux tels que le bois, les excréments, l'huile et la graisse pour cuisiner, se chauffer, s'éclairer et s'abriter ; c'est ce qu'on appelle aujourd'hui la biomasse traditionnelle. À l'Âge du bronze, le charbon de bois, produit par la combustion du bois dans une atmosphère pauvre en oxygène et qui brûle à une température plus élevée, permet d'extraire les métaux des minerais. Les animaux ont facilité de nombreuses tâches, les chevaux et les bœufs fournissant l'énergie de trait et le transport pendant de nombreux siècles.

La principale utilisation de l'énergie solaire, outre son importance pour la culture des aliments, était le chauffage et l'éclairage des habitations. Les Grecs et les Chinois de l'Antiquité ont construit des maisons dont les pièces principales étaient orientées vers le sud pour capter le soleil, et les Romains ont également ajouté des fenêtres en verre, qui permettaient de conserver la chaleur. Dans les climats chauds et secs, les maisons avaient tendance à être construites avec des murs très épais pour empêcher la chaleur de pénétrer pendant la journée et fournir de la chaleur la nuit. La chaleur du soleil était également utilisée pour sécher les matériaux, comme la cuisson au four de l'argile pour les briques, et pour conserver les aliments.

On utilisait un peu de charbon, de tourbe et de pétrole brut pour se chauffer et s'éclairer, mais leur contribution était faible et tendait à se limiter aux régions où ce combustible était facile à obtenir. Dans quelques endroits, l'énergie géothermique était disponible sous forme de sources chaudes. Cette source d'énergie est renouvelable car elle provient de la chaleur dégagée par l'intérieur de la Terre. Les Romains utilisaient ces sources dans certains de leurs bains, comme on peut le voir à Pompéi.

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Il existe des archives de bateaux à voile voguant sur le Nil il y a 5 000 ans. Les premiers voiliers avaient un seul mât avec une voile carrée, et étaient propulsés par leur voile lorsqu'il y avait un vent arrière.

Ces navires pouvaient également se déplacer de manière oblique face au vent en orientant leur voile de manière à attraper le vent. La voile se courbait et le vent créait une différence de pression qui poussait la voile dans une direction perpendiculaire à celle du vent, tout comme l'air qui s'écoule sur une aile d'avion donne de la portance. Les premiers galions méditerranéens, comme la trirème romaine ou les navires vikings, combinaient rames et voiles, mais la plupart des navires marchands étaient des voiliers. Les voiles triangulaires, appelées voiles latines – une alternative plus simple et moins chère aux voiles des gréements carrés – se sont imposées au ^e siècle et permettent aux navires de virer de bord face au vent (cf. figure 1).



Fig. 1 Voiles latines.

Les navires à voile ont ouvert le commerce maritime dans le monde entier et ont évolué vers des navires à plusieurs mâts, équipés de voiles carrées et de voiles latines, qui pouvaient parcourir de grandes distances à une vitesse respectable. Les « clippers » transportant du thé au milieu du ^{xix}^e siècle pouvaient se déplacer à plus de 15 nœuds (28 km/h) et avaient une vitesse moyenne d'environ 7,5 nœuds, similaire à celle des yachts de course modernes. Le transport de marchandises par voie maritime était généralement beaucoup moins cher et plus facile que par voie terrestre, car les routes étaient souvent peu praticables.

La première utilisation connue de l'énergie éolienne sur terre remonte au ^x^e siècle en Perse, où des moulins à vent à axe vertical étaient utilisés pour pomper l'eau et pour moudre le grain. Des moulins à vent similaires étaient utilisés en Chine, où ils sont peut-être apparus en premier. Ces machines étaient moins efficaces que les moulins à vent à axe horizontal qui sont apparus en Angleterre, en France et au Pays-Bas vers le ^{xii}^e siècle. Ces moulins à vent se sont rapidement répandus vers l'est de l'Europe au cours du ^{xiii}^e siècle, souvent, au départ, dans des endroits sans accès à des moulins à eau. Ils étaient principalement utilisés pour moudre le grain, pomper l'eau et scier le bois. Les premiers moulins étaient montés sur des poteaux et pouvaient être tournés manuellement pour faire face au vent. Dans les moulins plus grands et plus tardifs, introduits vers le ^{xiv}^e siècle, seul le sommet avec les voiles et l'arbre à vent pouvait pivoter. L'utilisation de grands moulins à vent a atteint son apogée au ^{xix}^e siècle, époque à laquelle les moteurs à vapeur au charbon, plus compacts et disponibles sur demande, ont pris le relais.

LA PUISSANCE DE L'EAU

Les roues à aubes ont été développées en Égypte, en Chine et en Grèce il y a plus de 2 000 ans, dans les deux siècles précédant le

premier millénaire. Elles ont d'abord été utilisées pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable puis, au début du premier millénaire, elles ont été modifiées pour actionner des machines telles que des meules et des scies.

Une usine romaine équipée de seize roues à eau pour mouder le grain fonctionnait en Gaule au II^e siècle de notre ère, et les moulins à eau étaient répandus dans les empires chinois et romain au V^e siècle. Leur utilisation à des fins industrielles s'est répandue dans les pays musulmans au X^e siècle et en Europe au XII^e siècle, où les moines cisterciens, par exemple, s'en servaient pour forger des métaux et pour fabriquer de l'huile d'olive.

Dans les roues à aubes utilisées pour élever l'eau, l'eau coulait sous une roue montée verticalement. Des seaux fixés à la jante de la roue étaient remplis et vidés au fur et à mesure que la roue tournait. On pense que certaines roues arabes pouvaient soulever l'eau de 30 m. On pouvait obtenir plus de puissance en faisant couler l'eau sur le sommet d'une roue, remplissant les compartiments fixés à sa jante. Le mouvement et le poids de l'eau faisaient tourner la roue. Les roues hydrauliques horizontales, avec un axe vertical et de l'eau se déversant d'un côté de la roue, étaient plus simples à construire et convenaient bien aux cours d'eau rapides. Le mouvement des marées était également utilisé à petite échelle à l'époque médiévale pour alimenter les moulins à eau sur la côte. L'énergie marémotrice est également renouvelable, car les pertes dues au mouvement des marées et à l'extraction de l'énergie des marées n'ont qu'un effet négligeable sur le mouvement relatif de la Lune, de la Terre et du Soleil.

La révolution industrielle a d'abord été alimentée par l'eau. En 1771, Richard Arkwright a utilisé des roues hydrauliques pour actionner ses métiers à filer le coton dans la première usine textile, dans le Derbyshire, en Angleterre. Cette technologie a été considérablement améliorée en 1827 par l'ingénieur français Benoît Fourneyron qui a enfermé le flux d'eau dans un large tube cylindrique et l'a fait passer

devant des lames fixes incurvées. Celles-ci dirigeaient l'eau horizontalement sur toutes les pales mobiles qui étaient fixées à un axe vertical (cf. figure 2). La turbine était compacte et permettait d'augmenter considérablement le débit et la pression de l'eau (et donc la puissance générée). Elle était également 80 % plus efficace que la roue à aube. Une machine en fonctionnement à Fraisans (France) en 1832 produisait environ 37 kW de puissance avec une petite chute d'eau (qui indique la pression) de 1,4 m et une turbine de 2,9 m de diamètre. Ce fut une avancée majeure qui annonça les turbines hydrauliques modernes.

Alors que les moteurs à vapeur alimentés au charbon ont remplacé l'énergie hydraulique pour la filature du coton en Angleterre, les turbines hydrauliques sont restées importantes en France et aux États-Unis au cours du XIX^e siècle. À la fin de ce siècle, la production d'électricité à l'aide d'énormes turbines hydrauliques a été développée. La première grande centrale hydroélectrique aux États-Unis, construite par Nikola Tesla et George Westinghouse, en 1895, sur les chutes du Niagara, ont utilisé trois turbines Fourneyron capables de fournir chacune 3 700 kW.

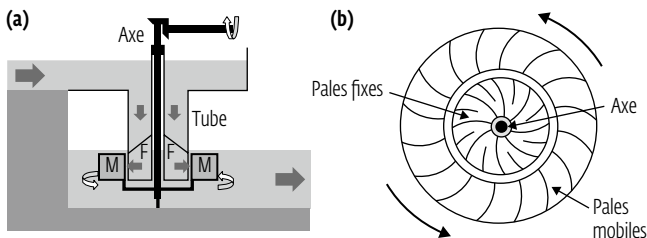


Fig. 2 ▶ (a) Schéma d'une turbine Fourneyron : les pales fixes (F) dirigent le flux d'eau à travers des fentes dans le tube sur les pales mobiles (M), attachées à un axe vertical. (b) Section horizontale à travers le logement de la roue de la turbine.

LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES FOSSILES

En Grande-Bretagne, l'utilisation du charbon n'a cessé de croître après le ^{xii}e siècle en raison de la pénurie de combustible sous forme de bois et de charbon de bois. La pollution due à la combustion du charbon, un problème que nous connaissons bien aujourd'hui, a conduit à des tentatives infructueuses d'interdire son utilisation à Londres à partir du ^{xiii}e siècle. L'utilisation du charbon a réellement pris son essor lors de la révolution industrielle du ^{xviii}e siècle, le charbon remplaçant le charbon de bois dans la fonte des minerais de fer ; la demande a encore été alimentée par le développement de puissantes machines à vapeur par Watt et dans la seconde moitié du ^{xviii}e siècle. La révolution industrielle s'est étendue à l'Europe, à l'Amérique du Nord, puis au monde entier, et le commerce s'est développé massivement avec l'introduction de navires à vapeur alimentés au charbon et de trains à vapeur, ce qui a considérablement augmenté la demande mondiale de charbon.

Le pétrole brut était utilisé en quantité relativement faible depuis des millénaires en Chine, en Arabie, en Asie centrale et ailleurs. L'exploration du pétrole pour les lampes et pour la lubrification était déjà en cours en Amérique du Nord et en Europe au milieu du ^{xix}e siècle. Le début de l'industrie pétrolière moderne est généralement attribué à Edwin Drake qui a conçu une méthode pour éviter l'effondrement des côtes d'un trou foré dans des graviers en installant un tube jusqu'à la roche-mère. En 1859, en Pennsylvanie, il a trouvé du pétrole à 21 m de profondeur pour un rendement de 20 à 40 barils par jour. Malheureusement pour lui, il n'a pas fait breveter son invention et n'a pas gagné d'argent. La demande en pétrole a augmenté avec le développement des voitures à moteur à combustion interne à la fin du ^{xix}e siècle. Les voitures et les camions sont désormais les principaux consommateurs de pétrole, raffiné en essence et en diesel.

Le gaz a été produit pour la première fois à des fins commerciales par la gazéification du charbon au début du ^{xix}e siècle, et servait

initialement à l'éclairage des rues. Avec l'introduction de l'éclairage électrique vers la fin du xix^e, le gaz de houille a fini par être utilisé uniquement pour la cuisine et le chauffage. Le gaz naturel provenant des gisements de pétrole a complètement remplacé le gaz de houille à la fin du xx^e siècle. Aujourd'hui, le gaz naturel est de plus en plus utilisé dans les centrales électriques pour produire de l'électricité, à la place du charbon plus polluant.

LE RETOUR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

À l'exception de l'hydroélectricité, qui a connu une croissance constante au cours du xx^e siècle et qui fournit aujourd'hui près d'un sixième de la demande mondiale d'électricité, les énergies renouvelables ont été une ressource négligée pour la production d'électricité pendant la majeure partie de cette période, car elles n'étaient pas compétitives sur le plan économique. Mais les crises des prix du pétrole des années 1970 ont incité les gouvernements occidentaux à parrainer des programmes de recherche sur diverses technologies d'énergie renouvelable, dans le but de réduire leur dépendance au pétrole. L'énergie éolienne, tirant parti des connaissances de l'industrie aéronautique en matière de conception de pales, a été la première technologie à devenir commercialement viable, bénéficiant de faibles coûts d'investissement et d'allègements fiscaux. Cependant, le développement de l'énergie éolienne dans les années 1970 et 1980 a fluctué en fonction du prix du pétrole. Malgré cela, certains pays ayant accès à des vents forts et préoccupés par la disponibilité d'une énergie abordable (pour leur sécurité énergétique) ont continué à la soutenir. La prise de conscience progressive des dangers du réchauffement climatique a aussi favorisé son développement. Aujourd'hui, le coût de l'énergie éolienne est compétitif par rapport à celui des combustibles fossiles dans de nombreuses régions.

L'énergie marémotrice a également suscité beaucoup d'intérêt dans les années 1970, mais il a été rapidement reconnu que les coûts

d'investissement étaient élevés et que la plupart des dispositifs étaient incapables de résister à de violentes tempêtes en mer.

Néanmoins, quelques modèles sont encore en cours de développement, notamment ceux qui sont immergés et placés au fond des mers. L'énergie marémotrice n'est économiquement viable que dans les régions où l'amplitude des marées est importante ou lorsque le flux moyen des marées est suffisamment rapide, quelques zones s'y prêtent, les meilleures étant au large des côtes d'Amérique du Nord et autour du Royaume-Uni.

Les cellules photovoltaïques ont mis beaucoup plus de temps à s'imposer sur le marché de l'énergie. L'effet photovoltaïque génère une tension lorsque certains matériaux sont éclairés. Ce phénomène a été observé pour la première fois en 1839 par Edmond Becquerel. Mais ce n'est que dans les années 1950 que les Laboratoires Bell ont, pour la première fois, développé des cellules photovoltaïques en silicium, avec des rendements d'environ 6 %. Cependant, leur coût élevé les limitait à des applications de niche dans les satellites et le programme spatial. Les crises pétrolières des années 1970 ont stimulé l'intérêt pour les cellules photovoltaïques. Au cours des dernières décennies, les méthodes de production de masse ont permis de réduire considérablement le coût des cellules solaires. Nous en sommes maintenant au point où l'électricité produite par les fermes solaires est commercialement compétitive dans de nombreuses régions du monde.

Dans un autre domaine, la croissance de l'industrie des biocarburants au cours de la seconde moitié du xx^e siècle a ralenti en raison des préoccupations liées aux émissions de dioxyde de carbone associées au défrichement des terres et aux conflits qu'elle engendre avec la production alimentaire. Cependant, la biomasse est une source d'énergie importante dans les pays en développement. Et tant que les émissions liées à la plantation et à la récolte sont négligeables, elle reste neutre en carbone, dans la mesure où le dioxyde de carbone produit par la combustion de la matière est réabsorbé par les nouvelles cultures.

R

Rayonnement infrarouge 29, 30
Réacteur à eau pressurisée 113
Réseau intelligent 124, 125
Réseau intercontinental 123
Ressources 11, 36, 38, 39, 45, 52,
62, 65, 77, 103, 110, 129, 161, 162
Révolution industrielle 14, 16, 19,
21, 28, 35
Roues à aube 13, 14

S

Santé publique 21
Schuman, Frank 56
Sihwa, Corée du Sud 102
Silicium type-n 84, 85
Soufre 28, 134
Stockage d'air comprimé 134
Subventions 19, 25, 92, 127, 159
Sunshot (programme) 58
Swansea (proposition de lagune)
103
Swanson (loi de) 91

T

Tchernobyl 42, 114
Thermosiphon 54, 55
Three Mile Island 114
Thunberg, Greta 164
Tour de blocs de béton 135

Transports 21, 22, 23, 24, 36, 40,
119, 136, 137, 144, 147, 153, 154,
158, 161, 163, 164, 165
Trump, Donald 34, 160
Turbine Wells 107

U

Usine marémotrice 14, 17, 18, 43,
101, 102, 103, 104, 105
Usine marémotrice La Rance,
France 102, 103
Utilisations de la terre 13, 18, 28,
34, 37, 39, 40, 45, 46, 47, 49, 50,
51, 53, 65, 66, 70, 71, 72, 75, 76,
78, 90, 93, 117, 138, 144, 157, 165

V

Vanadium (batterie) 133, 134
Vapeur 13, 15, 16, 20, 24, 30, 33,
56, 57, 108, 113, 136, 140, 141, 143
Véhicules électriques 131, 132, 136,
144, 145, 146, 154, 155, 157, 164
Voiles latines 12, 13
Voitures 16, 27, 37, 49, 53, 129, 130,
131, 143, 144, 145, 146, 147, 154,
157, 161, 163
Voitures hybrides 146

W

Watt-crête (W_p) 90
Watt, James 16, 20, 90

