

Sortir des énergies fossiles. Enjeux climatiques, énergies renouvelables et questions démocratiques

Marc Delepouve, Bertrand Bocquet

▶ **To cite this version:**

Marc Delepouve, Bertrand Bocquet. Sortir des énergies fossiles. Enjeux climatiques, énergies renouvelables et questions démocratiques. Cahiers d'histoire du Cnam, 2020, L'énergie solaire : trajectoires sociotechniques et objets muséographiques, vol.13 (1), pp. 141-160. hal-03200155

HAL Id: hal-03200155
https://cnam.hal.science/hal-03200155

Submitted on 16 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Article de synthèse

Sortir des énergies fossiles
Enjeux climatiques, énergies renouvelables et questions démocratiques

Marc Delepouve
HT2S – Histoire des Technosciences en Société (EA 3716), Cnam / Université de Lille

Bertrand Bocquet
HT2S – Histoire des Technosciences en Société (EA 3716), Cnam / Université de Lille

Résumé

La transition énergétique actuelle se distingue des précédentes dans la mesure où il ne s'agit pas d'ajouter une nouvelle source d'énergie mais de la substituer à celle utilisée massivement, l'énergie fossile. La cause n'est pas l'épuisement de cette dernière mais les effets délétères engendrés sur l'environnement terrestre, notamment le climat. L'article explore la hauteur de l'enjeu climatique et montre que, si les connaissances scientifiques permettent depuis le début du xxi^e^ siècle d'affirmer l'existence d'un changement climatique d'origine anthropique porteur d'une menace majeure sur les sociétés humaines, en revanche une part d'imprévisible et de non quantifiable demeure et renforce la menace. D'où un nécessaire appel au principe de précaution pris comme un facteur favorisant l'innovation. Cependant, la complexité et l'ampleur de l'indispensable transition renforcent l'idée d'une plus grande implication citoyenne dans la recherche permise par les nouvelles méthodologies de recherche-action participative.

Mots-clés : transition énergétique ; changement climatique ; principe de précaution ; complexité ; recherche participative.

Abstract

The current energy transition differs from the previous ones because it is not a new energy source to add up but a substitution of fossil energy which is intensively used. The cause is not the depletion of fossil energy but their harmful effects on the environment of earth, especially climate-wise. This paper investigates climate challenges through the fact that the scientific knowledge had shown the existence of anthropogenic climate

change since the beginning of the 21st century. Climate change poses a major threat to human societies reinforced by the fact that a part of unpredictability and non-quantifiability remain. The precautionary principle must be applied but like a factor favouring innovation. However, the complexity and the scale of the necessary transition reinforces the idea of a greater citizen involvement in research, as made possible by the new participatory action research methodologies.

Keywords: energy transition; climate change; precautionary principle; complexity; participatory action research.

Abstract

L'énergie du rayonnement solaire parvenant à la surface de la Terre est égal à plusieurs milliers de fois la consommation énergétique actuelle de l'ensemble de l'humanité. Par ailleurs, l'orientation et l'organisation de la recherche ne semblent pas toujours adaptées à l'ampleur et à l'urgence des enjeux globaux de la transition énergétique actuellement amorcée (Delepouve & Paul Antoine, 2016). Le présent propos présente une revue de littérature partielle appuyée sur les domaines de recherche des deux auteurs[1] et aborde deux grands types d'arguments permettant de comprendre pourquoi cet enjeu des énergies renouvelables – et au premier chef celui de l'énergie solaire – doit être placé en tête de l'agenda de la transition énergétique.

L'attention sera portée dans un premier temps sur les séries documentaires et empiriques existantes concernant à la fois le réchauffement climatique et les ressources énergétiques globales. Beaucoup plus qu'on ne le soupçonne parfois, des points d'accord scientifiques importants se dégagent aujourd'hui en ces matières, sur la base de fondements disciplinaires très différents. Le changement climatique est désormais admis par l'ensemble des États de la planète. Cette reconnaissance s'appuie notamment sur le mode original de synthèse des résultats des recherches relatives aux évolutions du climat réalisées périodiquement par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont les modélisations contribuent à l'identification et la quantification des facteurs participant au changement climatique. Ces modèles servent également à proposer des scénarios pour le futur. Ces derniers montrent que la sortie accélérée des systèmes énergétiques fossiles devrait être une priorité mondiale.

1 Marc Delepouve termine une thèse sur le GIEC à la croisée de l'épistémologie et des rapports science, expertise et politique ; il a en outre travaillé sur les enjeux de la transition énergétique. Bertrand Bocquet mène ses recherches dans le domaine des Sciences en société par l'expérimentation et l'analyse d'interfaces fondées sur des démarches de recherche participative.

Cette situation de transition énergétique est inédite. Pour autant, des solutions alternatives utilisant les énergies renouvelables, et en premier lieu l'énergie issue du rayonnement solaire, comme on le verra dans un second temps, existent. Mais ces énergies renouvelables sont cependant porteuses de problématiques sociotechniques et démocratiques qui dépassent l'argument de la nécessité climatique. Ces énergies ne sont pas seulement décarbonées : elles questionnent la nature des « convertisseurs énergétiques » (électricité, hydrogène, etc.), l'échelle et la continuité territoriales des modes d'approvisionnement énergétiques – circuits courts, réseaux, îlots et « *communautés énergétiques* » (Sebi & Vernay, 2020) –, les formes d'usages ou même de rentabilisation de l'énergie – la radiation du soleil plus que tout autre étant par nature permanente et gratuite. Elles nécessitent donc des travaux de recherche transdisciplinaires qui puissent croiser les différents enjeux, la complexité des interactions et la diversité des contextes. En un mot les énergies renouvelables nous entraînent à repenser le développement scientifique et la démocratie technique, à nous ouvrir à la recherche participative et à la pensée du complexe, à réexaminer les formes de gouvernance énergétique.

Changement climatique global et transition énergétique nécessaire

La fin du doute climatique

Les séries empiriques récentes portant sur le changement climatique débutent en grande partie par trois articles du numéro de la revue *Nature* du 1er octobre 1987 exposant les résultats d'analyses de calottes glaciaires de Vostok et renforçant l'hypothèse d'un réchauffement global dû aux gaz à effet de serre d'origine anthropique (Jouzel & *al.*, 1987 ; Bardola & *al.*, 1987 ; Genthon & *al.*, 1987). Un an plus tard, à la demande du G7, sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) était créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)[2].

Le GIEC est une interface entre science et politique dont la mission n'est pas de mener des recherches en propre, mais d'établir une synthèse des connaissances scientifiques relatives aux évolutions du climat (Aykut & Dahan, 2015). Le GIEC n'est pas habilité à faire

2 Les membres de son bureau sont élus par son Assemblée générale, composée des 195 représentants des États membres. Des scientifiques sont proposés par les États membres comme auteurs des rapports, puis parmi ceux-ci le bureau nomme les auteurs effectifs. Enfin, l'Assemblée générale définit la feuille de route du GIEC et adopte les résumés des rapports, c'est-à-dire les textes dont des éléments seront diffusés par les médias et repris par les politiques publiques ou les ONG.

des propositions directes aux décideurs mais il expose les conséquences sur le climat, sur la biosphère et sur les sociétés humaines de différents scénarios dessinés par des choix politiques. Depuis 1990, date du premier rapport du GIEC, les rapports successifs confortent l'hypothèse d'un changement climatique d'origine essentiellement anthropique, le *5e rapport d'évaluation* (2013-2014) affirmant même que « *le réchauffement du système climatique est sans équivoque* »[3] et « *l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie* ».

La question du lien de nécessité entre le niveau de certitude scientifique actuellement acquis sur le réchauffement et l'engagement de l'action visant à s'en prémunir continue de faire débat. Dès 1979 et la publication du rapport de l'Académie américaine des sciences, *Carbon Dioxide and Climate : a Scientific Assessment*[4], les connaissances scientifiques étaient en effet suffisantes pour alerter les politiques, envisager de convoquer le principe de précaution et amorcer une transition afin d'écarter le risque d'un réchauffement climatique global, voire une bifurcation du système climatique aux conséquences majeures et irréversibles pour l'humanité. Une quarantaine d'années s'est maintenant écoulée durant laquelle les enjeux n'ont cessé de croître alors que les transformations nécessaires sont restées largement insuffisantes pour y répondre.

Une origine anthropique démontrée

Les conclusions du GIEC attribuent aux variations des concentrations de Gaz à effet de serre (GES) la cause essentielle du dérèglement climatique en cours, sachant qu'elles « *ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800000 ans* »[5]. « *La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque pré-industrielle* »[6] ; celle du méthane, dont la puissance moléculaire en termes d'effet de serre vaut 60 fois celle du dioxyde de carbone, de l'ordre de 150 %[7].

L'augmentation du taux de dioxyde de carbone s'explique « *en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols* », *sachant que* « *l'océan a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux* »[8]. Quant au méthane, l'augmentation de son taux dans l'atmosphère s'explique pour environ 60 % par les activités agricoles (rizière en surface inondée, élevage de ruminant, fumier…) et pour environ un tiers par les

3 GIEC, 2013, *5e rapport d'évaluation*, Groupe de travail 1, p. 4.

4 Publié en ligne sur le site du Brookhaven National Laboratory [URL : https://www.bnl.gov/envsci/schwartz/charney_report1979.pdf].

5 GIEC, 2013, *5e rapport d'évaluation*, Groupe de travail 1, p. 11.

6 *Idem*.

7 *Ibid*.

8 *Ibid*.

fuites de méthane liées à l'exploitation des énergies fossiles, conventionnelles et non conventionnelles[9].

Finalement, le GIEC conclut que « *l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie, et ce, sur la base des données concernant l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le forçage radiatif positif, le réchauffement observé et la compréhension du système climatique* »[10].

Il est notable que les passages ci-dessus sont extraits d'un résumé à l'intention des décideurs rédigé par des scientifiques du groupe 1 du GIEC. Ils ont été adoptés en 2013 par chacun des représentants des gouvernements des 195 États membres de l'organisation, après échanges entre scientifiques et politiques.

Les scénarios d'évolution

Le 5e rapport du GIEC (2013-2014) donne une représentation du changement climatique au cours du XXIe siècle qui se décline en 4 profils.

À une extrémité, nous avons le profil volontariste – dont l'objectif est de rester sous les 2 °C, conformément à l'accord de la COP15, Copenhague 2009 – caractérisé par une réduction de 40 à 70 % des émissions anthropiques de GES entre 2010 et 2050, et des émissions presque nulles, voire négatives, en 2100[11].

À l'autre extrémité, nous avons le profil passif, caractérisé par une absence d'effort d'atténuation supplémentaire, conduisant à des augmentations de la température en 2100 d'environ 3,7 à 4,8 °C par rapport à la période 1850-1900, « *pour une réponse médiane du climat* »[12].

Suite à la déclaration qui a conclu la COP21 à Paris en 2015, le GIEC a publié un rapport spécial autour de l'objectif de ne pas dépasser 1,5 °C. Les scénarios visant cet objectif se caractérisent par la neutralité carbone atteinte aux environs de 2050.

Les rapports du GIEC donnent des repères aux politiques, lesquels peuvent s'en saisir, comme le montre le Pacte Vert pour l'Europe[13] et son objectif de neutralité carbone en 2050, présentés le 11 décembre 2019 par la Commission européenne, ou non, comme l'illustre Donald Trump, l'avant-dernier Président des États-Unis qui accusait les rapports du GIEC d'être trop alarmistes. Un paradoxe apparaît alors puisque ces mêmes rapports donnent une représentation édulcorée de ce que les avancées scientifiques nous

9 Global Carbon Project (2019). Global Carbon Atlas [URL : http://www.globalcarbonatlas.org/en/CH4-emissions].

10 GIEC, 2013, *5e rapport d'évaluation*, Groupe de travail 1, p. 15.

11 GIEC, 2014, *5e rapport d'évaluation*, Synthèse, Résumé à l'intention des décideurs, p. 21.

12 *Idem*.

13 Publié sur le site de la Commission européenne [URL : https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr].

disent des évolutions du climat durant la seconde partie du XXIe siècle. En effet, des phénomènes qui pourraient alimenter le réchauffement global durant la seconde moitié du XXIe siècle, voire avant, ne sont pas pleinement pris en considération par les scénarios pour le XXIe siècle. Il s'agit de phénomènes scientifiquement identifiés, mais dont l'évolution n'est pas quantifiable, tels que la libération de méthane par la fonte d'hydrates des fonds marins, ou le dégel du pergélisol ou les bouleversements du vivant marin.

L'exemple le plus documenté actuellement est celui du pergélisol. Ce dernier est un réservoir de carbone, potentiel émetteur de quantités massives de gaz à effet de serre. Selon Florent Dominé, interviewé par L. Cailloce, « *1 700 milliards de tonnes de carbone d'origine végétale s'y sont accumulées, c'est deux fois plus de carbone que n'en contient actuellement l'atmosphère !* » (Cailloce, 2015, p. 32). Entre 2003 et 2016, une équipe internationale de chercheurs a surveillé l'évolution du pergélisol de trois sites canadiens représentatifs de la partie arctique du continent américain. Le constat est celui d'un dégel du pergélisol à des profondeurs supérieures à celles projetées pour l'an 2090 par les scénarios RCP 4.5 du *5e rapport d'évaluation* du GIEC (Farquharson & *al.*, 2019). Or ces scénarios prévoient pour la période 2090-2100 un réchauffement probable situé entre 2 et 3,5 °C par rapport à la période 1850-1900 ; donc très au-delà des 0,9 °C de réchauffement de la période 2003-2016 par rapport à celle de 1850-1900.

La nécessité d'un principe de précaution climatique

Dès 1987, nous l'avons vu, les conditions étaient réunies pour convoquer le principe de précaution à l'égard du dioxyde de carbone et du changement climatique. L'histoire semble se répéter avec le méthane. Les estimations de sa masse contenue dans les hydrates des fonds marins se situent entre $0{,}5.10^{12}$ et $2{,}5.10^{12}$ tonnes, soit entre 100 et 500 fois plus que la masse de méthane contenue actuellement par l'atmosphère (Ramstein, 2015). Une portion de ce stock de méthane est susceptible de se retrouver dans l'atmosphère au cours du XXIe siècle. Son évaluation nécessite des études supplémentaires. En 2010, une étude de l'International Arctic Research Center (IARC) de l'université de Fairbanks en Alaska, montrait que les fuites du méthane emmagasiné sous la forme d'hydrates sous 2,1 millions de km^2 de l'Arctique avaient démarré et « *pourraient déclencher un réchauffement climatique brutal* » (Shakhova & *al.*, 2010, p. 1246). En 2011, lors de la rédaction du *5e rapport d'évaluation* du GIEC, la nature et l'importance de la contribution de la fonte d'hydrates de méthane aux précédents réchauffements climatiques du Quaternaire étaient (et restent largement) des inconnues scientifiques faisant l'objet de recherches

exploratoires, et ce phénomène ne sera pas pris en compte dans les scénarios du 5e rapport du GIEC (Masson-Delmotte, 2011, p. 99-100).

Les océans sont des entités régulatrices qui sont encore insuffisamment étudiées. Ils hébergent un nombre astronomique d'organismes vivants qui constituent le principal régulateur de la composition chimique de l'atmosphère et du climat. Au sein des océans, les équilibres et les cycles, tout à la fois chimiques, biologiques et thermiques, en place depuis le début du Quaternaire, sont aujourd'hui perturbés. Ils sont soumis au réchauffement, à l'acidification, au chargement en nitrate et en microparticules de plastique[14] pour n'évoquer que les pollutions les plus importantes[15] (Boucher & *al.*, 2017). La pêche intensive de surface ou proche de la surface a perturbé et perturbe toujours plus les écosystèmes marins. Depuis les années 1990, s'est ajoutée la pêche en eaux profondes qui pénètre jusqu'à plus de mille mètres sous la surface. Ces perturbations anthropiques des océans s'opèrent de façon aveugle. Or, les mutations de micro-organismes unicellulaires et de virus se diffusent à une vitesse sans commune mesure avec celle d'organismes tels que les mammifères, et ces mutations sont particulièrement adaptées aux évolutions du milieu. Il s'avère particulièrement difficile de prédire comment le vivant des océans évoluera concrètement dans les décennies et les siècles à venir. C'est pourquoi, conformément au principe de précaution, l'humanité devrait accorder toute son attention à la protection des océans et à une régulation prononcée de la génération de gaz à effet de serre d'origine anthropique.

La disponibilité des énergies fossiles et nucléaires : réalités et limites

En ce qui concerne les énergies fossiles, si un épuisement des ressources accessibles de pétrole et de gaz naturel pourrait se présenter à moyen terme (dans environ 50 ans au rythme de consommation actuel), l'échéance est plus lointaine pour le charbon (environ 130 ans au rythme de consommation actuel)[16]. Finalement, un mixte énergétique[17] composé de pétrole, de gaz naturel, et de charbon pourrait satisfaire les besoins en énergie de l'humanité pour encore au moins près d'un siècle. Les augmentations de la consommation mondiale d'énergie se poursuivraient par la découverte de

14 Boucher J. & Damien F. (2017). *Primary microplastics in the ocean. A Global Evaluation of Sources*. Rapport de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN). 22 février 2017.

15 GIEC, 2013, *5e rapport d'évaluation*, Groupe de travail 1.

16 Selon les données du site Web de la British Petroleum, [URL : https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf].

17 La raréfaction du pétrole dans tous ses usages (avion, camion, voiture, production d'électricité…) serait notamment compensée par la liquéfaction du charbon ainsi que par le passage à la voiture utilisant de l'électricité produite par des centrales au charbon.

nouvelles ressources exploitables[18]. Si l'on envisage de plus l'exploitation des ressources d'hydrocarbures non conventionnels tels que les gaz de schistes et les sables bitumineux, le risque d'épuisement s'éloigne si bien que, à cet égard, la raison de se tourner vers les énergies renouvelables n'est pas urgente.

La notion d'épuisement des énergies fossiles comme facteur prépondérant d'une transition vers des énergies renouvelables a pourtant prévalu dans les années 1970 et a contribué à légitimer l'émergence du secteur énergétique d'origine nucléaire. L'uranium 235 constitue la majeure partie de la matière première utilisée dans les réacteurs atomiques actuels. Or ce minerai radioactif n'est présent qu'en faible quantité dans des conditions exploitables. Certes, au plan mondial les réserves prouvées sont de l'ordre d'un siècle de la consommation annuelle actuelle[19], mais l'énergie nucléaire couvre environ 5 % de l'énergie totale produite[20], si bien que si l'énergie nucléaire issue de l'uranium 235 était choisie pour couvrir tous les besoins mondiaux en énergie, elle serait épuisée en cinq années.

L'énergie nucléaire peut être produite avec d'autres minerais radioactifs, notamment l'uranium 238 (non fissile) transformé en plutonium 239 (fissile) et le thorium, ou encore avec des combustibles mixtes comme le Mox (plutonium et uranium). Dans le cas de l'uranium 238, sa disponibilité est environ 137 fois plus importante que celle de l'uranium 235, mais l'énergie nette produite à partir d'un atome d'uranium 238 est plus faible que celle produite à partir d'un atome d'uranium 235. Finalement, les évaluations de l'énergie nucléaire disponible à partir des réserves d'uranium 238 se situent entre 50 et 100 fois celle des réserves d'uranium 235. L'uranium 238 permettrait donc de couvrir la consommation mondiale actuelle d'énergie sur une durée de l'ordre de 2,5 à 5 siècles.

Ici, comme pour les énergies fossiles, la question actuellement n'est donc pas celle du risque d'un épuisement des ressources.

Le choix d'un tout nucléaire ne serait pas sans générer des problèmes importants à l'humanité qui sont de plusieurs ordres. Au niveau environnemental, les pollutions radioactives et chimiques liées à l'exploitation des mines et à l'extraction de l'uranium de son minerai sont importantes. La

18 Les ressources connues, accessibles et exploitables ici prises en compte sont celles de 2018. De nouvelles ressources exploitables sont et seront constamment ajoutées, suite aux évolutions des technologies d'exploitation et aux découvertes de nouveaux sites. Il faut ici noter que la fonte des calottes glaciaires polaires rendrait accessibles des sous-sols riches en hydrocarbures fossiles. C'est le risque de l'emballement qui est pointé.

19 Selon les données de l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE et de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), vues sur leur site web le 10 décembre 2020, [URL : https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15004] et [URL : https://www.iaea.org/fr/themes/la-production-duranium].

20 Selon les données portant sur l'année 2017 de l'Agence internationale de l'énergie [URL : https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy %20supply&indicator=TPESbySource].

gestion, l'élimination et le stockage des déchets radioactifs reste un sujet d'actualité scientifique et industriel (Topçu, 2013). Au niveau politique, les liens existants entre nucléaire civil et nucléaire militaire, les risques liés aux détournements de plutonium 239 ou d'autres matériaux radioactifs par des groupes ou réseaux divers nécessitent un système étatique fort afin de protéger les sites nucléaires et de retraitements. Des enjeux de gouvernance démocratique considérables sont ici à prendre en compte. La catastrophe de Tchernobyl n'est pas étrangère au délitement du système politique de l'URSS et celle de Fukushima à l'affaiblissement du système politique et étatique japonais lié au mode de gestion néolibéral. Comme pour les énergies fossiles, des conséquences géopolitiques majeures existent pour certains pays, comme par exemple les relations entre le Niger et la France (Hecht, 2016). Enfin se pose la question des coûts financiers, encore plus prononcée aujourd'hui avec l'envol des coûts liés à la sécurité des sites et aux niveaux d'investissements considérables nécessités par les nouvelles filières EPR ou ceux actuellement engagés pour la fusion nucléaire autour du projet international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Les fondements d'une transition énergétique singulière

L'ensemble des considérations précédentes appellent à une transition énergétique présentant une forte singularité : il ne s'agit plus d'ajouter de nouvelles énergies aux précédentes mais de les remplacer. L'objectif est colossal puisque l'énergie carbonée fournit de l'ordre de 75 % de l'énergie finale consommée dans le monde[21].

Dans les transitions énergétiques précédentes, l'objectif n'était pas de mettre un terme à une ou des sources d'énergie, mais de développer de nouvelles sources qui offraient de nouvelles opportunités et de nouveaux services. Par exemple, une des premières transitions liées à la révolution industrielle au XIX^e^ siècle a consisté à utiliser du charbon en Grande Bretagne pour remédier à des ressources à plus faible intensité énergétique (bois, tourbe) sans complètement les éliminer dans un premier temps.

Chaque transition des deux derniers siècles était catalysée par – et contribua à – des changements technologiques, économiques, sociaux et culturels, et se traduisit par une modification des rapports sociaux et des rapports géopolitiques (Debeir & *al.*, 2013 ; Bonneuil & Fressoz, 2013). Par exemple, le pétrole accompagna la diffusion de l'automobile et de l'avion. Il a ainsi contribué à la réduction des

21 Selon les données pour l'année 2017 de l'Agence internationale de l'énergie, croisées avec celles présentées sur la page Wikipédia francophone à la date du 10 décembre 2020 [URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales]. Nous avons pris en considération pour notre calcul les énergies non commercialisées, auto-consommées issues du bois, de pompes à chaleur, du rayonnement solaire…

distances spatiales, au déploiement de la société de consommation et à l'essor de l'individualisme. Il a permis de contourner la difficulté croissante de l'exploitation du charbon en Europe de l'Ouest. Il a aussi soustrait les systèmes de productions économiques nationaux au pouvoir des mineurs et à leur capacité collective de blocage de la production d'énergie. Enfin, le pétrole a modifié les échanges, les dépendances et les rapports de force entre les nations. Il est en particulier rapidement devenu un facteur déterminant des tensions et des conflits au Moyen-Orient (Mitchell, 2013).

Dans de nombreux cas, les tensions et les conflits géopolitiques entre les États ou en leur sein trouvent leurs causes dans une distribution mondiale hétérogène des ressources de pétrole et de gaz. Une transition énergétique menant à un abandon des énergies fossiles aurait de ce point de vue, selon toute probabilité, des effets positifs, quand bien même l'utilisation d'énergies renouvelables puisse engendrer des concurrences sur d'autres ressources. Il en est ainsi des terres rares et de certains métaux, dont l'indium que contiennent certains panneaux solaires. Par ailleurs, la production intensive d'agrocarburant est un exemple de surexploitation de ressources fragiles telles que le sol ou l'eau douce (Pollet, 2011).

Au final, les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydroélectricité, bioénergies, géothermie ou énergies marines) ne sont certes pas sans effets environnementaux et sanitaires, ni influences sur les changements sociaux, économiques, politiques, géopolitiques et culturels. L'exemple de l'énergie solaire est particulièrement intéressant pour étudier ces différentes interactions comme l'évoquent d'autres articles de ce dossier. Elle permet le développement de différentes technologies de production : photovoltaïque, thermique ou thermodynamique. Ces productions utilisent un continuum d'intensité technologique pouvant aller du *low tech* (thermique) au *high tech* (photovoltaïque) même si la combinaison des deux est possible (thermodynamique). Dans ces conditions, l'ouverture dans les choix scientifiques et techniques est considérable pour s'adapter à des contextes variés de ressources et de développements territoriaux, de considérations socio-économiques, sanitaires, environnementales, politiques ou juridiques. Cette ouverture peut s'exprimer sur l'ensemble de la chaîne du système énergétique – production, stockage, transformation, transport, distribution, consommation. Ce rapprochement des données énergétiques au plus près des territoires aurait également l'avantage d'une meilleure appropriation des questions énergétiques par les populations, un enjeu fondamental pour une réelle transition énergétique substitutive.

Vers de nouveaux systèmes socio-énergétiques : les voies de la recherche action participative et de la démocratie technique

Repenser le développement scientifique et la démocratie technique

Au tournant des années 1970, une remise en cause du modèle de développement des sociétés occidentales a vu le jour et englobé les deux facettes du progrès, humain et matériel. Elle s'est appuyée sur l'argumentaire d'un niveau insoutenable de développement pour notre espace de vie (Meadows *& al.*, 1972), la perception de vivre dans un monde fini (Jacquard, 1991), ainsi que le constat de dégâts du progrès toujours plus globaux (climat, biodiversité, pollution plastique…) et dépassant les capacités de régulation simples des années antérieures.

Le développement de technologies alternatives a été proposé. Citons par exemple le mouvement des « technologies appropriées » dont le concept a été proposé au milieu des années 1960 pour prendre en compte les dimensions économiques, techniques et sociales des pays en développement. Ce mouvement s'est aussi intéressé aux problèmes liés aux sociétés industrielles avancées au début des années 1970. Il est assez représentatif de l'état d'esprit régnant à l'époque et qui illustre sans doute le plus le cas des fondateurs et d'une part importante du personnel de la Sofretes[22]. Il s'agissait de concevoir des dispositifs techniques favorisant l'autonomie tout en demeurant d'un faible coût et d'une complexité instrumentale ou matérielle limitée. Les échanges de pratique furent nombreux avec comme toile de fond une volonté pour leurs promoteurs de favoriser une transformation sociale par voie ascendante. Force est de constater que cette perspective de démocratisation sociotechnique, malgré de nombreux soutiens et programmes internationaux, a peu à peu été délaissée. Ses promoteurs, selon Winner (2002), se sont notamment heurtés aux réalités organisationnelles du pouvoir et aux institutions qui contrôlent le développement scientifique, technologique et économique.

Cette époque charnière a confirmé la primauté des choix technoscientifiques pour les « *macro-systèmes techniques* » (Gras, 1997). Le système énergétique électrique français est peut-être emblématique d'une telle orientation avec l'avènement du parc des centrales nucléaires et du réseau de distribution qui lui correspond. Ce choix ne peut pas être indépendant de la structure organisationnelle de la recherche scientifique basée sur la spécialisation et des cloisonnements disciplinaires souvent très poussés. Cette approche présente des avancées indéniables en termes de connaissances et d'action, mais il n'est pas certain qu'elle soit adaptée à la résolution des problèmes globaux tels que nous les connaissons aujourd'hui.

22 Voir les articles du présent dossier.

Il est intéressant de ce point de vue d'observer l'émergence de nouvelles démarches scientifiques qui souhaitent intégrer les avancées des sciences de la nature avec d'autres types de savoirs et dans des processus de recherche originaux[23]. Sans être exhaustif, nous pourrions citer les travaux sur les systèmes complexes (Guespin, 2019), les recherches transdisciplinaires (Dedeurwaerdere, 2013 ; Popa & *al*., 2015), les démarches liant les sciences et la participation citoyenne (Irwin, 1995 ; Lengwiler, 2008 ; Pestre, 2011 ; Savoia & *al*., 2017 ; Blangy & *al*., 2018 ; Bocquet, 2018 ; Heigh & *al*., 2019).

Énergie diffuse et circuits courts de l'énergie : le cas du solaire

Le développement de l'énergie solaire a une influence sur la conception et la représentation de ce que peut ou doit être un système énergétique. Les unités de production énergétique sont en effet radicalement différentes s'il s'agit de centrales électriques puissantes et très localisées, ou de sources de faibles puissances et délocalisées. Outre la production, la distribution de l'énergie, constitutive du système énergétique, repose la question de l'architecture et de la gestion de ces réseaux. L'adaptation entre la puissance disponible et le besoin en énergie devient un paramètre important nécessitant une meilleure régulation du trafic énergétique entre production et consommation. Le modèle des unités centralisées nécessite un mode d'organisation sociale de même nature que son système technique, en particulier si ces unités présentent des risques sécuritaires importants (vols, attentats, accidents, etc.). Ce modèle s'accorde mal avec des politiques décentralisées. Les choix effectués en matière de système énergétique, comme l'ont montré de nombreux travaux dès le milieu du XX^e^ siècle, dès lors qu'ils induisent des techniques plus ou moins autoritaires ou démocratiques (Mumford, 1964), sont des choix de société (Sclove, 2003). Il n'y a pas, à cet égard, de déterminisme ou de « *destin technologique* » (Salomon, 1992). Ces considérations socio-technologiques rejoignent les questionnements liés à des démarches scientifiques mieux adaptées.

Les démarches liant les sciences et la participation citoyenne pourraient en effet tout particulièrement trouver leur place dans la transformation énergétique liée à la sortie du système des énergies fossiles. Ces pratiques s'inscrivent dans le courant récent de la « *démocratie technique* » apparu au début du XXI^e^ siècle (Callon, 1998 ; Callon & *al*., 2001 ; Lequin & Lamard, 2015), une perspective dans laquelle sont créées des « *arènes* » où peuvent se constituer des « *forums hybrides* » réunissant scientifiques, experts, praticiens et citoyens. Les objectifs de ces dispositifs, en matière d'énergies, pourraient

23 Felt U. & Wynne B. (2007). *Taking European knowledge society seriously*. Report of the Expert Group on Science and Governance, European Commission, Office for Official publications of the European communities.

concerner l'évaluation des technologies et des impacts, des coûts de mise à disposition, des effets induits locaux et globaux. Les expériences déjà réalisées de ce type de forums permettent également d'envisager des dispositifs proactifs de recherches participatives, c'est-à-dire la mise en place d'interfaces, encore rares en France, où seraient réunis des collectifs chercheurs-acteurs travaillant ensemble sur une problématique scientifique située (Bocquet, 2019). La promotion récente au niveau européen de la notion de « Communautés d'Énergie Renouvelable » (CER) entre dans ce contexte. Cette notion est d'ailleurs applicable à bien d'autres contextes énergétiques et jusqu'aux pays les plus énergétiquement défavorisés (Caille, 2020). Les communautés ainsi définies sont très diverses et peuvent, par exemple, regrouper des conso-producteurs (*prosumers*) conduisant à une appropriation citoyenne « par l'action » de la question énergétique, à l'image des coopératives de production électriques déjà nombreuses en Allemagne.

La fabrication de nouveaux systèmes de production énergétique n'en reste pas moins dépendante de la co-existence de structures très intensives en coût d'investissement et de fonctionnement avec des structures de coûts modestes mais très nombreuses. La production des nouveaux systèmes peut ainsi s'envisager en termes d'économie circulaire pour limiter les extractions et envisager l'accès aux matériaux sensibles au sein de futures « *mines urbaines* » de recyclage (Zuo & *al*., 2019). De même la limitation de la consommation énergétique et la récupération d'énergie (*energy harversting*) ont été envisagées de longue date par certains innovateurs ainsi que l'évoque en détail l'article sur le « froid et le solaire » du présent dossier[24]. L'objectif est de récupérer une énergie résiduelle, soit immédiatement sous forme thermique, avec l'exemple du chauffage des bâtiments par la climatisation des centrales de données (*data center*), soit dans le futur sous forme électromagnétique, avec les micro-ondes émises par quantités d'antennes relais ou de boîtiers Wifi qui pourraient permettre de recharger des batteries ou d'alimenter de l'éclairage (Hawkes & *al*., 2013). Les choix de localisation d'activités, enfin, participent de la recherche d'un optimum énergétique, tels les grands « serveurs *cloud* » qui se dirigent aujourd'hui vers les pays froids du nord de l'Europe pour leur refroidissement, tandis que des « aciéries solaires » (et tout autre procédé industriel utilisant de grandes quantités d'énergie thermique) pourraient se localiser dans des régions telles que le Sahara, ainsi que cela avait été envisagé dès le début du XX^{e} siècle, par exemple par Augustin Mouchot (Caille, 2017). Ces perspectives dépendent cependant de complémentarités internationales, au demeurant différentes de celles de la géopolitique des énergies fossiles actuelle.

24 Voir l'article dans le présent dossier, Caille F. et Mouthon A., « Du solaire par le froid et inversement. Techniques frigorifiques et énergie solaire, une continuité technologique oubliée ».

Vers une nouvelle prospective pour le développement de filières énergétiques territoriales

La mise en place de systèmes et de mixtes énergétiques locaux singuliers adaptés aux spécificités géographiques, climatiques, économiques et culturelles qui sont les leurs est une hypothèse de travail importante dans l'objectif de réduction des impacts négatifs liés aux besoins énergétiques. Dans cette perspective, chaque territoire, s'appuyant sur des programmes de recherche participative associant des chercheurs académiques de différentes disciplines et les acteurs de la transition énergétique dans une visée d'intérêt général, pourrait être appelé à penser et à mettre en œuvre sa propre transition vers un nouveau système énergétique. Ces programmes existent ou ont existé au niveau régional, national et européen (Bocquet, 2018), et de nouvelles compétences et de nouveaux savoirs peuvent émerger des recherches coopératives. Quelques travaux montrent déjà que l'implication du ou des public(s) – le terme devant s'entendre au sens du philosophe John Dewey (2010) qui renvoie *à ceux qui sont concernés par une action* – peut significativement améliorer les recherches dans le secteur de l'énergie et ouvrir l'éventail des solutions (Jellema & Mulder, 2016 ; Labussière & Nadaï, 2018). Cependant, les intérêts importants que revêtent les questions énergétiques dans les sociétés modernes impliquent de prendre en compte les façons dont les collectifs de participation sont configurés et les ouvertures/fermetures politiques qui sont susceptibles de se produire (Chilvers & Loghurst, 2016).

Chaque élément de la chaîne de l'énergie doit en effet être interrogé : la réflexion sur le mixte entre différentes sources d'énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, thermique ou thermodynamique, éolien, méthanisation…) ; la réflexion sur le mixte de différents modes de stockage des énergies (chaleur stockée par l'eau ou le minéral, hydrogène, batterie, remontée d'eau dans des réservoirs…) ; la réflexion sur le mixte modes de transports (individuel/collectif, privé/public…) ; la réflexion sur le mixte des modes de distribution et de consommation de l'énergie (accès continu, périodique, public/privé, etc.).

Cette approche de la complexité de l'accès et de l'usage dans le domaine des énergies concerne donc les recherches sur l'urbanisme, sur les territoires (urbain/rural), sur l'organisation des activités (par exemple la répartition des horaires de travail d'une agglomération pour faciliter l'usage des transports en commun), sur l'architecture, sur les matériaux, sur les comportements et la mobilisation d'acteurs sociaux tels que les collectivités locales, les entreprises, les consommateurs. Il est remarquable de voir que la Sofretes, avec le travail des époux et architectes Marie-Jeanne et Georges Alexandroff qui en furent des collaborateurs dès la création (voir leur ouvrage de synthèse de 1982), avait été très loin dans ce domaine dès le

milieu des années 1970, dans l'esprit des travaux précurseurs aujourd'hui redécouverts d'Ivan Illich (1973) ou de Yona Friedman (1984).

Conclusion

La raison de l'urgence de la transition énergétique, comme on l'a montré, ne concerne pas l'épuisement des ressources fossiles ou nucléaires : ce sont les impacts humains et éco-systémiques effectifs ou potentiels de ces énergies, dans le contexte d'un emballement du changement climatique global, qui nécessitent d'être questionnés. Les diagnostics et les solutions sont liés et complexes. Ils requièrent de comprendre l'énergie solaire, notamment, comme une voie à emprunter selon des chemins pluriels, tenant compte des caractéristiques de systèmes énergétiques locaux et territorialisés. La connaissance d'expériences pionnières comme celles du solaire thermodynamique de basse température sur laquelle s'attarde ce numéro est importante. Car c'est probablement par l'invention de nouvelles démarches de recherche, de nouvelles médiations entre les différents savoirs scientifiques et d'action, sans négliger une large sensibilisation des publics, que la transition énergétique vers un avenir plus solaire pourra s'effectuer.

Références

Alexandroff G. & Alexandroff J.-M. (1982). *Architectures et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat.* Paris : Berger-Levrault.

Aykut S. C. & Dahan A. (2015). *Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales*. Paris : Presses de SciencesPo.

Barnola J.-M., Raynaud D., Korotkevich Y.S. & Lorius C. (1987). « Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO_2 ». *Nature,* vol. 329, pp. 408-414.

Beck U. (1993). « De la société industrielle à la société à risques ». *Rev. suisse socio.*, 19, pp. 311-337.

Blangy S., Bocquet B., Fiorini C., Fontan J.-M., Legris M. & Reynaud C. (2018). « Recherche et innovation citoyenne par la Recherche Action Participative ». *Technologie et Innovation*, 18, 3, pp. 1-17.

Bocquet B. (2018). « Les sciences en société : voies de la recherche et de l'innovation responsables ». *In* D. Uzunidis (dir.). *Recherche académique et innovation. La force productive de la science*. Bruxelles : Peter Lang, pp. 203-250.

Bocquet B. (2021), « Recherche participative, éléments d'une démocratie technique délibérative ». *In* P. Lamard & Y. Lequin (dir.). *Démocratie technique*. Éditions Université Technologique de Belfort-Montbéliard.

Bonneuil C. & Fressoz J.-B. (2013). *L'événement Anthropocène, La Terre, l'histoire et nous.* Paris : Le Seuil.

Caille F. (2017). « L'énergie solaire thermodynamique en Afrique : la Société française d'études thermiques et d'énergie solaire, ou Sofretes (1973-1983) ». *Afrique contemporaine*, n° 261-262, pp. 65-84.

Caille F. (2020). « Sortir des pensées (et des carburants) fossiles ? Éduquer aux énergies et à l'Économie sociale et solidaire ». *In* J. Stoessel-Ritz & M. Blanc (dir.). *Comment former à l'économie sociale et solidaire*. Rennes : Presse Universitaire de Rennes.

Cailloce L. (2015). « Pergélisol, le piège climatique ». *Journal du CNRS*, n° 279, janvier, pp. 30-35.

Callon M. (1998). « Des différentes formes de démocratie technique ». *Annales des mines*, 9, pp. 63-73.

Callon M., Lascoumes P. & Barthe Y. (2001). *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*. Édition révisée 2014, Paris : Seuil.

Chilvers J. & Longhurst N. (2016). « Participation in transition(s) : reconceiving public engagements in Energy Transitions as Co-Produced, Emergent and Diverse ». *Journal of Environmental Policy & Planning*, 18, 5, pp. 585-607.

Debeir J.-C., Deléage J.-P. & Hémery D. (2013). *Une histoire de l'énergie*. Paris : Flammarion.

Dedeurwaerdere T. (2013). « Transdisciplinary Sustainability Science at Higher Education Institutions : Science Policy Tools for Incremental Institutional Change ». *Sustainability*, 5, pp. 3783-3801.

Delepouve M. & Paul Antoine A. F. (2016). « Vers une recherche responsable ». *In* M. Delepouve, F. Paul Antoine, J.-C. Simon & M. Benatouil (dir.). *Transition énergétique, changement de société*. Paris : Éditions du Croquant.

Dewey J. (2010). *Le public et ses problèmes*. Paris : Gallimard.

Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L., Walker D. A., Kokelj S. V. & Nicolsky D. (2019). « Climate Change Drives Widespread and Rapid Thermokarst Development in Very Cold Permafrost in the Canadian High Arctic ». *Geophysical Research Letters*, 46, 12, pp. 6681-6689.

Floyd M. (2014). « SAR11, oceans' most abundant organism, has ability to create methane ». *Oregan State University (OSU). News and Research Communications*, [URL : https://today.oregonstate.edu/archives/2014/jul/sar11-oceans%e2%80%99-most-abundant-organism-has-ability-create-methane].

Friedman Y. (1984). *Alternatives énergétiques ou la civilisation paysanne modernisée. Pour une réelle économie des ressources : comment désindustrialiser l'énergie*. Escalquens : Éditions Dangles.

Genthon G., Barnola J.-M., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Barkov N. I., Korotkevich Y. S. & Kotlyakov V. M. (1987). « Vostok ice core : climatic response to CO_2 and orbital forcing changes over the last climatic cycle ». *Nature*, vol. 329, pp. 414-418.

Gras A. (1997). *Les Macro-systèmes techniques*. Paris : PUF.

Guespin J. (2019). *Complexité, dialectique et émancipation*. Paris : Éditions du Croquant.

Hawkes A. M., Katko A. R. & Cummer T. A. (2013). « A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality ». *Appl. Phys. Lett.,* 103, 163901-3.

Hecht G. (2016). *Uranium africain. Une histoire globale*. Paris : Seuil.

Illich I. (1973). *Énergie et équité*. Paris : Flammarion, 2018 (textes de 1973).

Irwin A. (1995). *Citizen Science : A Study of People, Expertise and Sustainable Development*. London : Routledge.

Jacquard A. (1991). *Voici le temps du*

monde fini. Paris : Seuil.

Jellema J. & Mulder H. A. J. (2016). « Public engagement in Energy Research ». *Energies*, 9, p. 125.

Jouzel J., Lorius C., Petit J.-R., Genthon C., Barkov N.I., Kotlyakov V.M. & Petrov V.M. (1987). « Vostok ice core : a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years) ». *Nature*, vol. 329, pp. 403-408.

Labussière O. & Nedaï A. (2018). *Energy transitions, a socio-technical inquiry.* Hampshire : Palgrave Macmillan.

Lequin Y. C. & Lamard P. (2015). *Éléments de démocratie technique*. Belfort : Presses de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Lengwiler M. (2008). « Participatory Approaches in Science and Technology. Historical Origins and Current Practices in Critical Perspective ». *Science, Technology, & Human Values*, 33(22), pp. 186-200.

Masson-Delmotte V. (2011). *Climat : le vrai et le faux*. Paris : Le Pommier.

Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. & Behrens W. W. (1972). *The Limits to Growth*. New York : Universe Books.

Mitchell T. (2013). *Carbon democracy. Le pouvoir politique à l'ère du pétrole*. Paris : La Découverte.

Mumford L. (1964). « Authoritarian and democratic technics ». *Technology and Culture*, 5, 1, pp. 1-8.

Pestre D. (2011). « Des sciences, des techniques et de l'ordre démocratique et participatif ». *Participations*, 2011/1, pp. 210-238.

Pollet F. (2011). « Expansion des agrocarburants au Sud : dynamique et impacts ». *In* B. Duterme & F. Polet (dir.). *Agrocarburants : impacts au Sud ?* Paris : Syllepse.

Popa F., Guillermin M. & Dedeurwaerdere T. (2015). « A pragmatist approach to transdisciplinarity in sustainability research : From complex systems theory to reflexive science ». *Futures*, 65, pp. 45-56.

Ramstein G. (2015). *Voyage à travers les climats de la Terre*. Paris : Odile Jacob.

Salomon J.-J. (1992). *Le destin technologique*. Paris : Gallimard.

Savoia A., Lefebvre B., Millot G. & Bocquet B. (2017). « The Science Shop Concept and its Implementation in a French University ». *Journal of Innovation Economics & Management*, 2017/1 (22), pp. 97-117.

Sclove R. (2003). *Choix technologiques, choix de société*. Paris : Descartes & Cie.

Sebi C. & Vernay A.-L. (2020). « Community renewable energy in France : The state of development and the way forward ». *Energy Policy*, 147, 111874, pp. 1-13.

Shakova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupovn V., Kosmach D. & Gustafsson Ô. (2010). « Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf ». *Science*, n° 327, 5970, pp. 1246-1250.

Topçu S. (2013). *La France nucléaire. L'art de gouverner une technologie contestée*. Paris : Seuil.

Winner L. (2002). *La baleine et le réacteur. À la recherche de limites au temps de la haute technologie*. Paris : Charles Léopold Mayer et Descartes et Cie.

Zuo L., Wang C. & Corder G.D. (2019). « Strategic evaluation of recycling high-tech metals from urban mines in China : An emerging industrial perspective ». *Journal of Cleaner Production,* 208, pp. 697-708.