



HAL
open science

Sortir des énergies fossiles : les atouts du solaire dans les énergies distribuées

Marc Delepouve, Bertrand Bocquet

► **To cite this version:**

Marc Delepouve, Bertrand Bocquet. Sortir des énergies fossiles : les atouts du solaire dans les énergies distribuées. 2020. hal-02510686

HAL Id: hal-02510686

<https://hal.science/hal-02510686>

Preprint submitted on 18 Mar 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Sortir des énergies fossiles : les atouts du solaire dans les énergies distribuées

Marc Delepouve*, Bertrand Bocquet

Cnam, Univ. Lille, EA 3716 - HT2S - Histoire des Technosciences en Société, F-75003, Paris, France

* Correspondant : Marc.Delepouve@univ-lille.fr

Introduction	1
Les réalités du changement climatique global	2
L'origine anthropique	2
Les perspectives à 2100.....	3
La nécessité d'un principe de précaution	4
Les singularités de la transition énergétique actuelle	5
Des énergies fossiles et nucléaires inépuisables ?	6
Une urgence environnementale avérée.....	7
Une bifurcation énergétique nécessaire.....	8
Une diversité d'enjeux extra-climatiques.....	8
Géopolitique, gouvernance démocratique et réduction des tensions	9
Repenser le développement scientifique et la démocratie technique.....	9
Énergie diffuse et circuits courts de l'énergie	10
L'enjeu social, environnemental et sanitaire	11
La prospective vers le développement de « filières énergétiques distribuées »	11
Pour des projets internationaux de recherche à la hauteur des enjeux.....	12
Les pistes de la contextualisation par la Recherche Action Participative pour intégrer la pensée du complexe.....	12
Conclusion.....	13

Introduction

Quatre grands types d'arguments permettent de souligner l'importance de l'énergie solaire, et plus largement des énergies renouvelables, dans le mix énergétique mondial du futur : la réalité du changement climatique global en cours et l'urgence de son atténuation ; les enjeux géopolitiques autour des énergies ; les enjeux sociaux, en particulier l'accès aux droits sociaux fondamentaux ; les enjeux démocratiques et de gouvernance des choix scientifiques et techniques.

L'histoire de la Sofretes évoquée dans les autres contributions du présent dossier croise de multiples manières ces divers arguments : si des énergies non fossiles avaient été développées plus tôt la situation serait différente aujourd'hui en termes climatiques, géopolitiques, sociaux et démocratiques. L'histoire ne se réécrit pas. Mais toutes les erreurs du passé ne sont pas vouées à être indéfiniment reproduites. C'est à expliciter certaines des voies d'un autre futur que le propos ci-dessous est consacré

Le 1er octobre 1987, une série de trois articles du même numéro de la revue *Nature* exposaient les résultats d'analyses de calottes glaciaires de Vostok et renforçaient l'hypothèse d'un réchauffement climatique 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). 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, les ONG...

Le GIEC est une interface science-politique dont la mission n'est pas de mener des recherches, mais d'établir une synthèse des connaissances scientifiques relatives aux évolutions du climat utiles aux décideurs politiques et économiques pour définir des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Mais il s'agit aussi de fonder les bases de la communication politique sur le changement climatique à destination des populations (Aykut & Dahan, 2015). Enfin, le GIEC n'est pas habilité à faire des propositions directes aux décideurs ; par contre il expose les conséquences sur le climat de différentes options politiques, et en retour les conséquences sur le système Terre et sur les sociétés humaines. De plus, le GIEC avait pour mission d'évaluer le niveau de certitude d'un réchauffement climatique global, son ampleur et ses causes. 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) affirme que " *l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie* ".

Ce niveau de certitude scientifique acquis était-il indispensable à l'action ? Dès 1979 et la publication du rapport de l'Académie américaine des sciences, *Carbon Dioxide and Climate : a Scientific Assessment*¹, rédigé sous la direction de Jule Charney, les connaissances scientifiques étaient suffisantes pour alerter les politiques, convoquer le principe de précaution et opérer une transition afin d'écartier 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 et les transformations nécessaires de devenir de plus en plus urgentes. Aujourd'hui, une prise de conscience s'affermir au sein de l'ensemble de la société...

Nous montrons que, si les énergies renouvelables – solaires notamment - constituent une part importante de la solution, elles requièrent une forte évolution des systèmes énergétiques. Nous examinons en particulier la singularité de la transition énergétique à effectuer et énumérons ses principaux enjeux climatiques, géopolitiques, sociaux et de gouvernance démocratique. Nous évoquons notamment des pistes pour l'élaboration de politiques de recherche résolument tournées vers le développement de systèmes énergétiques distribués - c'est-à-dire de productions énergétiques différentielles dans l'espace et le temps -, et comportant de multiples sources énergétiques de tailles et de natures différentes insérées – au moins pour partie - dans des réseaux interconnectés. Ces systèmes présentent une orientation susceptible d'apporter aux populations une réappropriation des questions énergétiques. Ils questionnent aussi la nature de l'expertise et la possibilité de voies d'innovations plurielles dans le domaine.

Les réalités du changement climatique global

Un paramètre clé du changement climatique est l'élévation de la température moyenne du système terre, comme le souligne le GIEC : " *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé...* " (GIEC, 2013, p. 4). En outre, depuis quelques années nous observons une accumulation d'événements extrêmes ou d'anomalies climatiques (canicules, sécheresses, incendies de vastes zones forestières, inondations, cyclones et tempêtes plus fréquents, plus puissants et présents en des lieux géographique ou des périodes de l'année inédits...).

Il reste à déterminer les causes de ce " *réchauffement du système climatique* ". Les conclusions du GIEC attribuent aux Gaz à effet de serre (GES) une influence prépondérante liée aux activités radiatives qu'entretient le système terre avec lui-même et son principal pourvoyeur d'énergie qu'est le soleil. Les variations des concentrations de ces gaz constituent la cause essentielle du dérèglement climatique en cours. Elles sont d'un niveau exceptionnel puisque " *Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour*

¹ https://www.bnl.gov/envsci/schwartz/charney_report1979.pdf

atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. " (GIEC, 2013, p. 11). Quant à la concentration atmosphérique du méthane, dont la puissance moléculaire en termes d'effet de serre vaut 60 fois celle du dioxyde de carbone, son augmentation est de l'ordre de 150% depuis l'époque préindustrielle (GIEC, 2013) et de fortes incertitudes sont présentes quant à son devenir. Certaines études, portant notamment sur l'histoire longue du climat (Ramstein, 2015), montrent que des effets d'emballements sont possibles avec les émissions de méthane lors de la fonte du pergélisol ou par les hydrates de méthane des fonds océaniques.

L'origine anthropique

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. L'océan a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux. " (GIEC, 2013, p. 11). 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 fuites de méthane liées à l'exploitation d'énergies fossiles, conventionnelles et non conventionnelles (fuites aggravées dans le cas du gaz de schiste) (Global Carbon Project, 2019).

Finalement, le GIEC conclut : " 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. " (GIEC, 2013, p. 15)

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

Sylvain Mondon précise le rôle de la modélisation climatique dans ses déclarations du GIEC :

« Le 4e rapport d'évaluation du GIEC publié en 2007 a constitué une avancée importante, mais surtout le 5e rapport d'évaluation publié en 2013 (volume 1) et 2014 (synthèse, volumes 2 et 3) puisque désormais, les modèles climatiques ne parviennent plus à reproduire l'évolution du climat observé depuis la fin du XIX^e siècle sans prendre en compte les émissions de GES directes (ex. combustion du charbon et du pétrole) et indirectes (ex. déforestation) d'origine humaine même en tenant compte de la plage d'incertitude des simulations. Autrement dit, pour reproduire fidèlement les observations du climat passé avec les modèles numériques du système terre, il est nécessaire d'inclure les émissions de GES anthropogéniques. » (Mandon, 2017, pp. 30-31).

La modélisation climatique apporte ainsi une contribution majeure à la preuve du réchauffement du système climatique et de son origine essentiellement anthropique. L'intérêt de la modélisation climatique a aussi pour objectif de renseigner le futur. Sur cette base, le 5e rapport d'évaluation du GIEC (2013-2014) donne une représentation du changement climatique au cours du XXI^e siècle qui se décline en 4 profils. Chacun de ces derniers résulte d'une hypothèse d'évolution de la concentration de GES qui résulte elle-même d'une hypothèse d'évolution des émissions atmosphériques de gaz à effet de serre, des émissions de polluants atmosphériques et de l'utilisation des terres au XXI^e siècle.

A une extrémité nous avons le profil volontariste dont l'objectif est de rester sous les 2°C : " Selon les scénarios d'atténuation conduisant en 2100 à des concentrations atmosphériques d'environ 450 ppm eqCO_2 ou moins, il est probable que le réchauffement sera maintenu durant le XXI^e siècle à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Les scénarios visant ces concentrations d'ici 2100 se caractérisent par une réduction mondiale de 40 à 70 % des émissions anthropiques de GES entre 2010 et 2050, et par des émissions presque nulles, voire des émissions négatives en 2100. " (GIEC, 2014, p. 21).

A l'autre extrémité nous avons le profil passif : " Si, par rapport à ceux déjà en place, aucun effort supplémentaire n'est déployé, l'augmentation des émissions mondiales de GES devrait persister, entraînée par la croissance de la population et des activités économiques à l'échelle du globe. Les scénarios de référence, selon lesquels aucun effort d'atténuation supplémentaire n'est déployé, conduisent à des augmentations de la température moyenne à la surface du globe en 2100 d'environ 3,7 à 4,8 °C par rapport à la moyenne pour la période 1850–1900, pour une réponse médiane du climat. La fourchette comprenant l'incertitude climatique est de 2,5 à 7,8 °C (du 5^e au 95^e centile). " (GIEC, 2014, p. 21).

En octobre 2018, le GIEC a publié un rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Ainsi, pour la première fois il présente un scénario sous les 2°C, qu'il compare à la

situation actuelle (réchauffement de 1°C) et à un réchauffement de 2°C. Selon le résumé à l'intention des décideurs rédigé par des scientifiques et adopté par les représentants des gouvernements des États membres du GIEC ::

- *Les risques liés au climat pour les systèmes naturels et humains sont plus élevés pour un réchauffement global de 1,5°C que pour un réchauffement du niveau actuel, mais inférieurs à ceux d'un réchauffement de 2°C (confiance élevée). Ces risques dépendent de l'ampleur et de la vitesse du réchauffement, de la situation géographique, des niveaux de développement et de vulnérabilité, ainsi que des choix et de la mise en œuvre d'options d'adaptation et d'atténuation (confiance élevée).* (GIEC, 2018, p. 7).

- *Dans les trajectoires modélisées avec un dépassement nul ou limité de 1,5°C, les émissions anthropiques nettes mondiales de CO2 doivent diminuer d'environ 45% par rapport aux niveaux de 2010, d'ici à 2030 (avec un écart interquartile 40% - 60%), pour atteindre zéro net vers 2050 (écart interquartile 2045-2055). Pour limiter le réchauffement de la planète à moins de 2°C, les émissions de CO2 devraient diminuer d'environ 25 % d'ici à 2030 (écart interquartile 10% - 30%) dans la plupart des scénarios, et atteindre le zéro net autour de 2070 (écart interquartile 2065-2080).* (GIEC, 2018, p. 14).

Le Pacte Vert pour l'Europe² et son objectif de neutralité carbone en 2050, présentés le 11 décembre 2019 par la Commission européenne, s'inscrivent sur la trajectoire 1,5°C du GIEC ; du moins ils inscrivent le territoire de l'UE sur cette trajectoire, mais avec l'ambition de "faire de l'Europe le premier continent climatiquement neutre d'ici à 2050", ce qui entend implicitement que le reste du monde ne se situerait pas sur cette trajectoire. Il constitue néanmoins un événement politique majeur, à condition qu'il soit adopté par le Parlement européen et par le Conseil européen (instance réunissant les chefs d'État et de gouvernement des États membres), et qu'ensuite il soit mis en œuvre dans le respect de son objectif.

Les rapports du GIEC donnent des repères aux politiques, lesquels peuvent s'en saisir, comme le montre le Pacte Vert pour l'Europe, ou non, comme l'illustre Donald Trump, actuel Président des États-Unis qui accuse 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 disent des évolutions du climat durant la seconde partie du XXI^e siècle. En effet, des phénomènes qui pourraient alimenter le réchauffement global durant le XXI^e siècle, notamment durant sa seconde moitié, ne sont pas pris en considération par les scénarios pour le XXI^e siècle ou ne le sont qu'à minima. Il s'agit de phénomènes scientifiquement identifiés, mais dont l'expression durant le siècle n'est pas scientifiquement quantifiable, tels que : la libération de méthane par la fonte d'hydrates des fonds marins, le dégel du pergélisol ou les bouleversements du vivant marin. Ainsi, le 5e rapport d'évaluation du GIEC précise : "*Les scénarios utilisés par le Groupe de travail I sont axés sur les émissions anthropiques et ne prennent pas en compte les évolutions des facteurs naturels, tels que le forçage solaire ou volcanique, ou les émissions naturelles, par exemple de CH₄ et de N₂O.*" (GIEC, 2013, Résumé à l'intention des décideurs, p. 29). Avec cependant une exception, le scénario le plus pessimiste (profil passif) intègre une part de réchauffement due au permafrost située entre 0,04°C et 0,69°C entre 2013 et 2100 (GIEC, 2013, p. 1096).

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, selon ces scénarios, l'augmentation la plus probable de la température moyenne à la surface du globe serait de 2,4°C en 2090 par rapport à l'ère préindustrielle, alors que l'augmentation de la température moyenne est actuellement située aux environs de 1°C. Nous aurions donc une déstabilisation durant le XXI^e siècle du pergélisol du grand nord américain largement sous-estimée par le 5e rapport du GIEC (2013). Or le pergélisol est un réservoir de carbone, potentiel émetteur de quantités massives de gaz à effet de serre. Selon Florent Dominé, interviewé par Laure 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). Ce gigantesque réservoir de carbone était scientifiquement connu lors de la rédaction du 5e rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2013, p. 1116), et le risque d'une spirale rétroactive positive était identifié : le réchauffement climatique entraîne une fonte du pergélisol qui s'accompagne d'émissions de méthane et de dioxyde de carbone via la transformation par des micro-organismes vivants de molécules organiques en molécules carbonées gazeuses - CH₄ et CO₂ -, contribuant à une intensification du réchauffement du climat, et par rétroaction, occasionne une accélération de la fonte du pergélisol, etc.

2 https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

La nécessité d'un principe de précaution

Dès 1987, nous l'avons vu, les conditions étaient réunies pour convoquer le principe de précaution à l'égard du changement climatique. En 1992, le texte fondateur de la Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) y faisait référence en ces termes : « *Il incombe aux Parties de prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitudes scientifiques absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures* ». En 2000, la Commission européenne précisait : " *Le recours au principe de précaution présuppose que les effets potentiellement dangereux d'un phénomène, d'un produit ou d'un procédé ont été identifiés et que l'évaluation scientifique ne permet pas de déterminer le risque avec suffisamment de certitude* " (Commission européenne, 2000). Pourtant, il faudra attendre 2018-2019 pour voir monter en puissance la mobilisation citoyenne internationale pour le climat et se dessiner un premier projet politique européen - Le pacte vert pour l'Europe - qui, au moins à son stade initial, ne soit pas dérisoire au regard de la réalité du risque climatique. Pour y parvenir, il aura fallu plusieurs dizaines d'années durant lesquelles les preuves scientifiques du réchauffement du système climatique et de son origine essentiellement anthropique se sont multipliées et renforcées. Puis il aura fallu plusieurs années durant lesquelles la multiplication des événements météorologiques extrêmes et des anomalies climatiques aura été directement perçue par des populations et largement relayée par les grands médias. Si bien que sciences et événements se traduisent désormais en une prise de conscience et une inquiétude des populations humaines.

Les preuves scientifiques d'un changement climatique d'origine anthropique, rapide et impactant l'ensemble du système Terre en général sont établies, cependant le risque majeur d'un emballement de ce changement relève encore largement du principe de précaution, dont l'activation est encore plus urgente aujourd'hui, compte tenu du risque de fonte accélérée du pergélisol, de la déstabilisation d'hydrates de méthane ou de la modification des milieux vivants marins.

Les estimations de la masse de méthane 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). Toutefois, cette masse, située dans le sous-sol marin jusqu'à une profondeur d'une centaine de mètres sous l'eau, ne pourrait être relâchée que progressivement sur plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires. De plus, au cours de la remontée dans le sous-sol puis vers la surface des océans, une large part du méthane relâché serait vraisemblablement transformée, par des micro-organismes vivants, en dioxyde de carbone. Une portion réduite de ce stock de méthane est ainsi susceptible de se retrouver dans l'atmosphère au cours du XXI^e siècle. Son évaluation nécessite des études supplémentaires. 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. " *Des hydrates de méthane sont stockés dans les zones de pergélisol et dans certaines zones sous-marines. Ces énormes quantités de méthane pourraient être « relarguées » dans l'atmosphère en cas de réchauffement important des zones boréales ou des océans. Ce type de phénomène n'est actuellement pas pris en compte dans les modèles du climat car les processus de déstabilisation et l'ampleur des dégazages de méthane sont encore trop mal connus.* " (Masson-Delmotte, 2011, p. 99-100).

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 les 2 millions de km² de l'Arctique étaient alors déjà enclenchées et « pourraient avoir à l'avenir un effet dramatique sur le réchauffement climatique » (Shakhova & al., 2010).

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 pour n'évoquer que les pollutions les plus importantes (GIEC, 2013 ; 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. L'univers des micro-organismes (bactéries, archées, protistes)

et des virus marins va-t-il basculer et occasionner une modification de la composition de l'atmosphère terrestre ? A ce jour, ces interrogations n'ont pas de réponses scientifiques. C'est pourquoi, conformément au principe de précaution, l'humanité doit accorder toute son attention aux océans et, au plus vite, mettre un terme aux perturbations d'origine anthropique qui amorcent une rupture de leurs équilibres et pourraient enclencher une bifurcation particulièrement rapide du système climatique.

Encadré : Découverte d'une bactéries méthanogène. En 2014, dans la couche supérieure des eaux océaniques ont été découvertes certaines souches de bactéries SAR11 qui produisent du méthane (Floyd, 2014), ce qui engendre une présence importante de ce gaz à effet de serre dans les eaux de surface océanique situées loin des côtes. Cette découverte a résolu l'énigme de l'origine de cette présence abondante et mondiale de méthane en milieu océanique oxygéné : jusqu'alors, les seuls organismes vivants méthanogènes connus étaient des archées pour qui l'oxygène est toxique.

Les singularités de la transition énergétique actuelle

Des énergies fossiles et nucléaires inépuisables ?

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)³. Finalement un mixte⁴ pétrole, gaz naturel, charbon pourrait satisfaire les besoins en énergie de l'humanité sur plus de cinquante ans, voire sur près d'un siècle. Les augmentations de la consommation mondiale d'énergie se poursuivraient par la découverte de nouvelles ressources⁵ exploitables. De plus, nous n'avons pas considéré ici l'exploitation des ressources d'hydrocarbures non conventionnels tels que les gaz de schistes et les sables bitumineux. Le risque d'épuisement des hydrocarbures fossiles n'est donc en rien une raison de se tourner dès maintenant vers les énergies renouvelables.

Cette notion d'épuisement des énergies fossiles, brandi comme le facteur prépondérant d'une transition vers des énergies renouvelables, a prévalu dans les années 1970 et a contribué à faire émerger le 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 se situent entre 80 ans et un siècle de la consommation annuelle actuelle⁶, mais l'énergie nucléaire couvre environ 5% de l'énergie totale produite⁷, 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.

Mais l'énergie nucléaire peut aussi être produite avec d'autres minerais radioactifs, notamment l'uranium 238 (non fissible) - transformé en plutonium 239 (fissible) - et le thorium. Or l'uranium 238 disponible est environ 137 fois

3 Selon les données du site Web de la British Petroleum (<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>) ou encore de wikipedia: https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales.

4 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.

5 Les ressources connues, accessibles et exploitables ici prise en compte sont celles de 2018. Des nouvelles ressources connues et accessibles sont et seront constamment ajoutées, année après année : suite aux évolutions des technologies d'exploitation et aux découvertes de nouvelles ressources, lesquelles s'amplifieraient fortement si le choix du presque tout fossile se confirmait, en raison de l'emballement consécutif du changement climatique et de la fonte des calottes glaciaires polaires couvrant des territoires au sous-sol riche en hydrocarbures fossiles - Antarctique, Groenland, mer Arctique.

6 Selon les sites : <https://peg.mines-paristech.fr/html5/diapason/M3G2A4.html> et https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales

7 Selon les données portant sur l'année 2017 de l'Agence internationale de l'énergie.

plus abondant que l'uranium 235 et l'apport énergétique de la fission d'un atome de plutonium 239 est à peu près égal à celui d'un atome d'uranium 235. Toutefois, 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 (le bilan énergétique de la suite des réactions nucléaires en jeu ne se limite pas à l'énergie libérée par la fission du plutonium) ; si bien que les évaluations de l'énergie nucléaire disponible à partir des réserves d'uranium 238 varient de 50 à 100 fois celle de l'énergie nucléaire disponible à partir des réserves d'uranium 235, ce qui permettrait de couvrir la consommation mondiale actuelle d'énergie sur une durée de l'ordre de 2 à 5 siècles. Il faut noter que ces chiffres ne prennent pas en compte les réserves de thorium.

Les réacteurs nucléaires à neutrons rapides, dits de 4^{ème} génération, dont le déploiement de l'utilisation industrielle est programmé au cours des années 2020, utilisent notamment l'uranium 238. Ces réacteurs – parmi lesquels en France nous trouvons le projet Superphénix - permettraient donc de considérer l'énergie nucléaire comme inépuisable, au moins sur un horizon de plusieurs siècles. C'est aussi le cas, si l'on considère les évolutions techniques, des centrales de production électrique utilisant des combustibles mixtes comme le Mox (plutonium et uranium). Ici, comme pour les énergies fossiles, la question actuellement n'est donc pas celle du risque d'un épuisement des ressources. La question est celle des problèmes que le choix du tout nucléaire poserait à l'humanité. La gestion, l'élimination et le stockage des déchets radioactifs reste un sujet d'actualité scientifique et industriel (Topçu, 2013). Compte tenu des liens existants entre nucléaire civil et nucléaire militaire, il y a les risques liés aux détournements de plutonium 239 ou d'autres matériaux radioactifs par des groupes ou réseaux divers ou encore les risques d'attentats. Ces risques nécessitent un système politique et étatique fort à cause des protections à assurer aux sites nucléaires et affaiblissent la démocratie. Ces régimes ne sont pas à l'abri d'un affaiblissement ou d'un délitement, y compris ceux des pays qui aujourd'hui pourraient sembler particulièrement stables. De plus, le contexte de changement climatique et plus largement de bifurcation du système-Terre crée des sources inédites de tensions et de déstabilisations au sein de l'humanité. L'histoire récente devrait nous inviter à la prudence. La catastrophe de Tchernobyl n'est pas étrangère au délitement du système politique de l'URSS, celle de Fukushima à l'affaiblissement du système politique et étatique japonais lié au mode de gestion néolibéral. Des enjeux de gouvernance démocratique considérables sont donc ici présents.

En outre, le développement de l'énergie nucléaire n'est possible que par des évolutions majeures dans les technologies. Il sera de plus confronté à un renforcement de la sensibilité des publics sur la sûreté des activités nucléaires. Cette sensibilité est déjà conséquente car l'industrie nucléaire sort du cadre classique de l'interaction entre la théorie et la pratique se traduisant par le principe d'ingénierie basée sur le couple essai-erreur. Cette dernière n'est pas possible dans l'industrie nucléaire. En reprenant les propos de U. Beck (1993) « Le risque incompressible nous fait entrer dans le royaume de l'hypothétique... Il n'est plus possible de faire alterner théorie et expérimentation pour arriver à la vérité comme on le faisait traditionnellement ». Avec les investissements réclamés (voir par exemple le méga-projet ITER de fusion nucléaire⁸), c'est toute la question de la démocratisation des choix scientifiques et techniques qui se pose. Ces considérations font que l'énergie nucléaire présente un coût croissant qui la rend économiquement moins rentable. Par contraste, le prix de l'énergie solaire décroît rapidement depuis une décennie, si bien que cette énergie renouvelable dont le potentiel dépasse très largement les besoins humains est en passe de devenir bien moins coûteuse que l'énergie issue de la fission nucléaire, y compris en ne prenant pas en compte les coûts de démantèlement des centrales. C'est ici la viabilité économique et sociale de l'énergie nucléaire qui est en jeu.

Enfin, se présentent des pollutions radioactives et chimiques liées à l'exploitation des mines et à l'extraction de l'uranium de son minerai, ainsi que des conséquences géopolitiques majeures pour certains pays, dont le Niger pour la France par exemple (Hecht, 2016).

Une urgence environnementale avérée

La raison de l'urgence d'une transition énergétique vers les énergies solaires et plus généralement vers les énergies renouvelables n'est donc pas l'épuisement en tant que tel des ressources fossiles et nucléaires mais les impacts négatifs déjà effectifs ou potentiels de ces énergies. Compte tenu du poids des énergies fossiles dans le système énergétique mondial, le risque principal est celui d'un emballement du changement climatique. Il est d'abord fondé sur la menace de rétroactions positives du type : réchauffement climatique - émissions naturelles et massives de gaz à effet de serre. Ces rétroactions ont donné leur ampleur aux précédents réchauffements du Quaternaire. Le réchauffement actuel est déjà de niveau équivalent aux précédents, alors que ces rétroactions ne sont encore que marginalement exprimées.

8 <https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines>

Ce risque est ensuite fondé sur le vivant. Les organismes vivants sur les continents et dans les océans, qu'ils soient macroscopiques ou microscopiques, qu'ils soient pluricellulaires ou unicellulaires, sont tous soumis à des contextes environnementaux dont les changements sont profonds et inédits. Cela a et aura des conséquences sur ces organismes vivants, sur l'ensemble du vivant, avec de possibles boucles rétroactives de grandes ampleurs. C'est en particulier le cas pour le vivant des océans. Soumis à des perturbations les écosystèmes marins changent rapidement, se transforment. Or ces écosystèmes jouent un rôle majeur dans la composition chimique de l'atmosphère : taux d'oxygène, taux de dioxyde de carbone, taux de méthane, etc. Que deviendra le vivant dans les océans dans les décennies à venir ? Quel sera l'impact sur l'ensemble du système Terre et sur le climat ? A ce jour, ces questions n'ont pas de réponses scientifiques, car, d'une part, le vivant des océans restent insuffisamment connus, et d'autre part, le vivant soumis à des contraintes et des contextes profondément nouveaux et inédits peut évoluer tout aussi profondément et selon des voies toutes aussi inédites. D'autant que, en réponse à un environnement modifié les organismes unicellulaires marins, dont le rôle est majeur dans la composition de l'atmosphère, peuvent connaître des mutations et des évolutions imprévisibles ou plus simplement des modifications épigénétiques, dont la génération et la diffusion peuvent être particulièrement rapides, le plus souvent très en deçà de l'échelle d'une vie humaine (Guespin, 2011).

Une bifurcation énergétique nécessaire

L'enjeu des énergies renouvelables et de l'énergie solaire est donc le tout premier enjeu de la transition énergétique actuellement amorcée. Cette dernière vient après une série de transitions énergétiques qui se sont succédées depuis un peu plus de deux siècles où chacune consistait à ajouter une nouvelle source d'énergie à celles déjà existantes et déjà exploitées. L'objectif n'était alors non pas de volontairement mettre un terme à une ou des sources d'énergie, mais de développer une nouvelle source qui offrait de nouvelles opportunités et de nouveaux services. De plus, pour la première de ces transitions, consistant au développement de l'usage du charbon en Grande Bretagne, il s'agissait, mais pas seulement, de remédier à la raréfaction sur le territoire national des ressources utilisées (bois, tourbe), tout en se tournant vers une source à plus grande intensité énergétique et en visant une concentration et un usage intensif de la main d'œuvre (Malm, 2017).

Chacune des transitions énergétiques de cette série 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 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 forces entre les nations. Il est en particulier rapidement devenu un facteur déterminant des tensions et des conflits au Moyen-Orient (Mitchell, 2013).

La transition en cours présente une forte singularité, si bien qu'elle ne peut être que très partiellement éclairée par la connaissance des précédentes transitions. En particulier, elle se situe dans un contexte historique où, face à des défis vitaux pour l'humanité, elle ne consiste pas simplement à ajouter une nouvelle source d'énergie à celles déjà existantes, mais vise notamment à mettre un terme à l'usage des énergies fossiles. L'objectif peut sembler colossal puisqu'elles fournissent environ 78% de l'énergie finale consommée dans le monde⁹. L'enjeu est plus modeste pour la fission nucléaire qui fournit environ 5% de l'énergie finale consommée.

Une diversité d'enjeux extra-climatiques

L'enjeu environnemental tend à s'imposer comme le principal moteur de la transition énergétique vers un système reposant sur les énergies solaires et renouvelables. Cependant, ces dernières ne sont pas forcément des énergies

⁹ Source, les données pour l'année 2017 de l'Agence internationale de l'énergie, croisées avec 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...).

« totalement propres ». Que ce soit le solaire photovoltaïque, le solaire thermique ou thermodynamique, l'éolien, l'hydroélectrique, la bioénergie, la géothermie ou les énergies marines, chacune de ces sources d'énergie occasionne des effets plus ou moins nocifs aux plans environnemental et sanitaire. Par ailleurs, elles influencent des changements sociaux, économiques, politiques, géopolitiques et culturels. De plus, ces aspects doivent être étudiés sur l'ensemble de la chaîne du système énergétique (production, stockage, transformation, transport, distribution, consommation), comme le rappellent d'autres articles du présent dossier à l'égard de la mise en scène muséographique des énergies.

Il ressort des considérations précédentes que les choix énergétiques à opérer vers les énergies renouvelables auront des conséquences importantes sur les modèles politiques, et en particulier des retombées significatives sur les régimes démocratiques. Ainsi, en France, passer d'un système de production électrique très centralisé constitué de centrales nucléaires à un système de production électrique plus diffus nous ferait passer d'une société pyramidale et sécuritaire à une société plus horizontale et probablement plus participative. Cela impliquerait également un travail de recherche et d'innovation assez différent de celui qui continue aujourd'hui d'orienter les choix scientifiques et techniques.

Géopolitique, gouvernance démocratique et réduction des tensions

Dans de nombreux cas, en particulier au Moyen-Orient, les tensions et les conflits géopolitiques, voire les tensions et conflits au sein des États, trouvent dans leurs causes une distribution mondiale hétérogène des ressources de pétrole et de gaz. Une transition énergétique menant à un abandon des énergies fossiles contribuerait fortement à la réduction de tensions et de conflits. Toutefois, une telle réduction pourrait donner lieu à une augmentation d'autres causes de tensions et conflits. L'utilisation d'énergies renouvelable peut donner lieu à des tensions autour d'autres ressources comme les terres rares et certains métaux. Par exemple certains panneaux solaires contiennent de l'indium. Des tensions internationales, nationales ou locales peuvent aussi se développer autour de ressources fragiles ou déjà surexploitées telles que le sol ou l'eau douce (agrocarburants...) au sein de territoires de communautés humaines (Pollet, 2011).

Une politique énergétique peut favoriser ou au contraire entraver la souveraineté politique et donc démocratique, ce que nous pouvons illustrer au plan européen. Actuellement, le système énergétique européen repose principalement sur les énergies fossiles, lesquelles fluctuent autour de 15% du total des importations de l'Union européenne (UE) depuis 2015¹⁰ (elles s'élevaient à 23% en 2010). Une transition énergétique qui déboucherait sur la fin de l'utilisation d'énergies fossiles, auxquelles seraient substituées des énergies renouvelables produites très majoritairement dans l'Union européenne, et qui mettrait l'accent sur l'efficacité et la sobriété énergétiques, permettrait de réduire de plus de 10% les importations européennes. Cela permettrait à l'UE de diminuer d'une même ampleur l'impératif d'exportation de biens et de services, ce qui réduirait la pression que la concurrence internationale exerce sur les droits sociaux, sur la fiscalité et sur l'environnement. Finalement, l'autonomie politique de l'UE serait renforcée. La transition vers les énergies renouvelables pourrait donc constituer un levier pour développer l'autonomie politique de l'UE et donner pouvoir et sens à la démocratie.

Les questions sociotechniques sont encore aujourd'hui soumises à un profond déficit démocratique. Les voies technoscientifiques sont privilégiées car elles s'appuient historiquement sur les bénéfices de la révolution scientifique des Lumières et son corollaire constitué par la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle. Les progrès des conditions matérielles de l'existence y sont notables. Des effets négatifs l'ont aussi accompagné, minimisés par les discours dominants. Cependant, cette histoire du progrès donne à voir qu'une régulation puissante s'est opérée par l'exercice démocratique de nombreux collectifs défendant un intérêt général.

Repenser le développement scientifique et la démocratie technique

Au tournant des années 1970, une remise en cause profonde du modèle de développement des sociétés occidentales a vu le jour par de nombreuses prises de conscience. Les plus significatives déclinent 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) et des dégâts du progrès qui deviennent globaux (climat, biodiversité, pollution plastique...). Cette prise de conscience englobe les deux facettes du progrès, humain et matériel, et dépasse la simple

¹⁰ Selon Eurostat : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_-_recent_developments#Share_of_energy_products_in_total_EU_imports

régulation des années antérieures pour penser des modes de vie conforme aux contraintes imposés par le système Terre.

De nombreuses expériences de développements technologiques alternatifs ont été réalisées durant le dernier quart du XX^e siècle sans toutefois réussir à s'imposer. Le cas des technologies appropriées est assez représentatif de l'état d'esprit régnant à l'époque. Il s'agissait de concevoir des dispositifs techniques favorisant l'autonomie tout en étant bon marché. Les échanges de pratique étaient nombreux avec comme toile de fond une volonté pour leurs promoteurs de favoriser une transformation sociale par voie ascendante. C'était par exemple le cas des fondateurs et d'une part importante du personnel de la Sofretes (voir les articles du présent dossier). L'exemplarité devait être le moteur de l'agrégation de fractions de la population de plus en plus larges où les choix de construction et de consommation réorganiserait progressivement la société. Force est de constater que cette voie ascendante s'est enlisée, car selon Winner (2002), leurs partisans se sont heurtés aux réalités organisationnelles du pouvoir et aux institutions qui contrôlent le développement scientifique, technologique et économique.

Les choix technoscientifiques cruciaux effectués à cette époque connaissent aujourd'hui leurs pleins développements. Ils sont à l'image de la structure organisationnelle de la recherche scientifique basée sur la spécialisation et des formes de réductionnisme entraînant des cloisonnements disciplinaires souvent très poussés. Cette approche présente des avancées indéniables en terme de connaissances et d'action mais elle s'avère inadaptée à la résolution des problèmes globaux tels que nous les connaissons aujourd'hui. De nouvelles démarches scientifiques sont donc nécessaires. Elles se pratiquent encore marginalement et peinent à bénéficier des moyens dévolus aux recherches de court terme et aux débouchés économiques plus immédiats. Nous pourrions citer les recherches sur les systèmes complexes (Guespin, 2019), les recherches transdisciplinaires (Dedeurwaerdere, 2013 ; Popa & al., 2015) et 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).

Ces dernières démarches s'inscrivent dans le courant récent de la démocratie technique apparu au début du XXI^e siècle (Callon, 1998 ; Callon & al., 2001 ; Lequin & Lamard, 2014). Ce courant propose de créer des arènes où puissent se former des forums hybrides réunissant scientifiques, experts, praticiens et citoyens. Les objectifs travaillés concerneraient la détermination démocratique des choix scientifiques et techniques et l'évaluation des technologies. Si les objectifs premiers de l'ordre de la régulation technoscientifique sont les plus fréquents, les expériences déjà réalisées de ce type de forums ont aussi donné lieu à des dispositifs proactifs de recherches participatives (Bocquet, 2019). L'originalité de ces interfaces, encore rares en France, est de réunir des collectifs chercheurs-acteurs qui vont travailler ensemble sur une problématique scientifique située.

Énergie diffuse et circuits courts de l'énergie

La transition énergétique moderne s'inscrit pour certains dans le projet d'une transformation plus générale de la société vers des modes de vie plus écologique. Le développement des énergies renouvelables, et particulièrement de l'énergie solaire, a une influence sur la représentation de ce que peut ou doit être un système énergétique. En effet, les unités de production énergétique sont radicalement différentes entre des centrales électriques puissantes et très localisées et des sources de faibles puissances et délocalisées. Le modèle des unités centralisées nécessite un mode d'organisation de même nature, renforcé par un état sécuritaire si ces mêmes unités présentent des risques importants. Ce modèle s'accorde mal avec des politiques décentralisées où l'appropriation locale et participative permet une plus grande vitalité démocratique. Les choix de techniques autoritaires ou démocratiques (Mumford, 1964) effectués en matière de système énergétique sont des choix de société (Sclove, 2003) pour lesquels il n'y a pas de déterminisme ou de « destin » technologique (Salomon, 1992).

Outre la production, la distribution de l'énergie pour sa consommation est elle-aussi constitutive du système énergétique. Elle est constituée par des réseaux interdépendants dans lesquels s'inscrivent les sources de production, quelles soient centralisées ou non. La progression des énergies renouvelables repose alors de fait 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. Une architecture sous la forme de micro-réseaux autonomes et connectés, et l'apport des technologies numériques de communication permettraient de mieux appréhender cette régulation. Cependant, la controverse sociotechnique autour des compteurs communicants par exemple est une bonne illustration des tensions générées par l'appropriation des données collectées. Une évolution est donc nécessaire qui s'est traduit récemment par la promotion au niveau européen de la notion de Communautés d'énergie renouvelable (CER), une notion applicable à bien d'autres contextes énergétiques et jusqu'aux pays les plus énergétiquement défavorisés (Caille, 2020). Ces communautés sont très diverses et peuvent, par exemple, regrouper des *prosumers* (consoproducteurs)

conduisant à une appropriation citoyenne de la question énergétique par l'action, qu'il s'agisse de villages en Inde ou de coopératives de production électriques en Allemagne. Il est fort à parier que les développements autour de la méthanisation ou de l'hydrogène amèneront également à repenser les réseaux de distribution de gaz.

La fabrication des systèmes de production énergétique est aussi potentiellement impactée par la transition de structures quasi exclusivement intensives en coût d'investissement et de fonctionnement à la co-existence de ces dernières avec des structures de coûts modestes mais très nombreuses. Aussi, la conception des nouveaux systèmes nécessite de repenser leur production en terme de recyclage et d'économie circulaire. Par exemple, compte tenu des matériaux utilisés dans la fabrication d'une partie des panneaux solaires photovoltaïques, l'importation massive de panneaux solaires en Allemagne provenant de Chine constitue un stock, futures mines urbaines dans lesquelles pourront être extraits des matériaux rares pour la fabrication de panneaux solaires du futur.

Ce mouvement de réappropriation de la question énergétique pose aussi celle de la récupération d'énergie (*energy harvesting*), un aspect envisagé de longue date par certains innovateurs comme y revient en détail l'un des articles du présent dossier. Il s'agit ici bien souvent de récupérer une énergie résiduelle sinon dégradée sous forme thermique. On pense par exemple, parmi beaucoup d'autres situations possibles, à la climatisation des centrales de données (data center) qui permet le chauffage de bâtiments. Cette question de la récupération mériterait un appui scientifique plus conséquent pour récupérer de l'énergie de meilleure qualité et penser des usages annexes limitant le gaspillage. Par exemple, la récupération de l'énergie électromagnétique des micro ondes émises par quantités d'antennes relais ou de boîtiers Wifi pourrait permettre de recharger des batteries (Hawkes, 2013), voire d'alimenter de l'éclairage.

Enfin, la recherche d'un optimum énergétique peut accompagner des choix de localisation d'activités. Déjà de grands serveurs cloud migrent en Norvège, Islande, pays froids du nord, pour leur refroidissement. A l'inverse, les aciéries solaires (et tout autre procédé industriel utilisant de grandes quantités d'énergie calorifique) pourraient ou devraient migrer vers des régions telles que le Sahara. Ces perspectives ouvrent bien entendu à d'autres formes de collaborations et de complémentarités internationales que celles de la géopolitique des énergies fossiles actuelle.

L'enjeu social, environnemental et sanitaire

Les systèmes énergétiques actuels contribuent fortement à la déstabilisation et la bifurcation du système Terre : sols, océans, biosphère et climat. Les énergies fossiles sont aujourd'hui largement responsables de la dégradation de la qualité de l'air qui présente des conséquences importantes sur la santé : environ 48 000 décès par an en France¹¹. La transition vers des énergies renouvelables constitue donc un enjeu sanitaire majeur, en particulier dans les villes, mais aussi hors des villes car des gaz nocifs tels que l'ozone ou encore les micro-particules se déplacent.

Même si les énergies renouvelables comme le solaire, par la fabrication ou le transport des matériels, peuvent elles-aussi donner lieu à un rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce dernier est généralement très inférieur à celui lié aux énergies fossiles. Il s'agit là d'un avantage certain et très conséquent de ces énergies sur les énergies fossiles même si, par exemple, la construction de la plupart des générateurs d'éoliennes utilise des terres rares dont l'extraction entraîne aujourd'hui des pollutions des sols et des eaux et des effets toxiques pour les travailleurs, pour les populations locales, voire pour la production agricole¹². De même la production de biocarburants, dans leur grande majorité, se fait selon le modèle agricole productiviste et donne lieu à l'usage d'insecticide, d'herbicide et d'engrais qui polluent les sols, les eaux souterraines, les cours d'eau et finalement les océans. Il s'y ajoute des déforestations pour étendre les surfaces cultivées qui s'accompagnent d'une perte de biodiversité, d'une réduction de territoire pour des écosystèmes et d'émissions de gaz carbonique et de méthane, sans parler de la concurrence avec l'usage agricole des terres consacrées à l'alimentation des populations. Quant aux constructions de barrages d'exploitation de l'énergie hydraulique, notamment s'il s'agit de méga-barrages, elles se traduisent par la destruction d'écosystème au niveau des barrages et de l'aval des fleuves ainsi que par des émissions de méthane.

Il y a donc dans ces domaines des choix à opérer, des politiques à mettre en œuvre (financière, réglementaires...) – lesquelles réclament des programmes de recherche sociotechniques approfondis pour enfin aller vers un système énergétique plus soutenable. De manière plus large, le droit à la vie et à la santé à l'échelle planétaire implique des

11 Selon le Ministère de la Transition écologique et solidaire : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/pollution-lair-origines-situation-et-impacts>

12 Voir par exemple : https://www.lemonde.fr/asia-pacifique/article/2012/07/19/en-chine-les-terres-rares-tuent-des-villages_1735857_3216.html

capacités de déplacements, des équipements (centre médicaux, hôpitaux, écoles...) qui s'appuient à leur tour sur un accès financier (prix adaptés) et physique à l'énergie (déploiement du système énergétique sur tout les territoires), partout, et pour toutes et tous. L'expérience de la Sofretes ou le travail d'Abdou Moumouni évoqués dans le présent dossier, malgré leurs limites, étaient à cet égard très en avance sur de tels enjeux et les problématiques de justice énergétique, sanitaire et environnementale qui peuvent y être liées.

La prospective vers le développement de « filières énergétiques distribuées »

L'énergie du rayonnement solaire parvenant à la surface de la Terre est égale à plusieurs milliers de fois la consommation énergétique actuelle de l'ensemble de l'humanité. Si bien que cette source d'énergie inépuisable semble devoir occuper une place essentielle dans le futur mix énergétique. Toutefois, son intermittence et son inégale répartition géographique nécessitent de la coupler avec des techniques de stockage et de l'associer à d'autres sources d'énergies elles-mêmes renouvelables. En outre, les impacts sanitaires et environnementaux actuels ne sont pas négligeables, en particulier dans la production de matériaux utilisés pour une partie des panneaux solaires. Les recherches se poursuivent afin de réaliser d'indispensables sauts technologiques et de réduire les aspects négatifs, y compris au sein du CEA qui stoppa en 1983 les activités de la Sofretes, et insistent sur le potentiel sans équivalent et dans de nombreux domaines du solaire¹³. Reste qu'aujourd'hui l'orientation et l'organisation de cette recherche n'est pas adaptée à l'ampleur et à l'urgence des enjeux globaux de la transition énergétique (Delepouve & Paul Antoine, 2016). Et, si l'énergie solaire est propice à une production distribuée et à une appropriation locale et citoyenne, peu de travaux des grandes agences de recherche prennent en considération ces dimensions.

Pour des projets internationaux de recherche à la hauteur des enjeux

Les interrelations entre sciences et société sont continues depuis l'avènement des sciences modernes. La forme dominante aujourd'hui est celle de la diffusion des connaissances vers le monde socio-économique au travers de l'innovation. La recherche scientifique est de plus en plus orientée et organisée vers la défense ou le renforcement de la compétitivité des nations se traduisant par des travaux répondants aux demandes des entreprises, notamment des entreprises multinationales. Ceci est plus particulièrement prégnant dans les secteurs de la recherche dont la production peut directement nourrir le marché. Ainsi, les recherches relatives aux énergies renouvelables et à l'énergie solaire présente un caractère technoscientifique marqué et minimise, voire entrave, des développements de recherche orientée vers une transition énergétique répondant à des enjeux plus multifactoriels.

La transition énergétique telle que nous l'avons évoquée sur la base des rapports du GIEC nécessite en effet des programmes de recherche internationaux de grande ampleur et organisés selon les principes de coopération et de solidarité entre les nations qui rompraient avec la domination sans partage d'un paradigme de la concurrence et de la dispersion des ressources humaines et financières entre les nations et entre les entreprises de l'énergie.

Les pistes de la contextualisation par la Recherche Action Participative pour intégrer la pensée du complexe

Le changement paradigmatique des énergies renouvelables consistant à fournir une énergie distribuée pose la question des recherches à mener pour accompagner la transition énergétique. Une prise en compte des systèmes énergétiques locaux, des caractéristiques territoriales et s'appuyant sur une appropriation citoyenne des enjeux, l'ensemble étant couplé à des recherches académiques, pourrait être une voie intéressante. La réduction des impacts négatifs - environnementaux, sanitaires, sociaux, géopolitiques et démocratiques – liés aux besoins énergétiques, nécessite la mise en place de systèmes énergétiques locaux singuliers, adaptés aux spécificités géographiques, climatiques, économiques, culturelles..., qui couvrent chaque élément de la chaîne de l'énergie : mixte entre différentes sources (solaire photovoltaïque, thermique ou thermodynamique, éolien, méthanisation...) ; mixte de différents modes de stockage (hydrogène, batterie, remontée d'eau dans des réservoirs...) ; mixte de modes de transports, distribution et consommation. Ce dernier échelon repose notamment sur la recherche de l'efficacité et de la sobriété énergétiques, ce qui appelle des recherches sur l'urbanisme, sur l'organisation et la gestion des territoires (urbain et ruraux), sur l'organisation des activités humaines (par exemple diversifier et répartir de façon raisonnée les

horaires de travail d'une agglomération afin d'optimiser l'usage des transports en commun), sur l'architecture, sur les matériaux et sur les comportements et la mobilisation des acteurs (collectivités locales, entreprises, consommateurs) aux approches, cultures et intérêts différents, voire divergents. Déjà, avec le travail encore méconnu des époux Alexandroff, la Sofretes avait été loin dans ce domaine dès le milieu des années 1970, dans l'esprit des travaux précurseurs d'Yvan Illich (1973) ou de Yona Friedman (1984).

Finalement, chaque territoire pourrait dans cette perspective être appelé à penser et à mettre en œuvre une transition vers un nouveau système énergétique en développant des programmes de recherche convoquant l'ensemble des disciplines scientifiques (physique, sciences des matériaux, chimie, biologie, ingénierie, sociologie, économie, sciences politiques, psychologie, philosophie, ...) dans une démarche collective et transdisciplinaire, associant recherches théoriques, recherches participatives et recherches actions (catégories non disjointes), ce qu'a déjà proposé le récent rapport prospectif de l'institut Momentum sur « la biorégion 2050 Ile-de-France après l'effondrement »¹⁴.

Un système distribué fait appel nécessairement à des actions territorialisées. Il permet de rééquilibrer la présence des différents acteurs intéressés par le secteur énergétique en particulier vers les acteurs des organisations de la société civile à but non-lucratif ou les collectifs plus informels. Quelques travaux montrent que l'engagement du public peut améliorer les recherches dans le secteur de l'énergie, en créant des solutions qui soient en accord avec les valeurs et les demandes de la société (Jellema & Mulder, 2016 ; Labussière & Nadaï, 2018). Ces collaborations peuvent faire émerger de nouvelles compétences et de nouveaux savoirs, d'où l'importance de la participation. Pour aboutir à cette collaboration, il est nécessaire de constituer un "public" sur les questions de l'énergie. Le terme de "public" s'entend au sens du philosophe John Dewey (2010) et renvoie à "ceux qui sont concernés par une action". Cependant, les intérêts importants que revêtent les questions énergétiques impliquent de prendre en compte la répartition des pouvoirs dans nos sociétés modernes. Les analyses devraient pouvoir être menées sur les façons dont les collectifs de participation sont configurés et les ouvertures/fermetures politiques qui sont susceptibles de se produire. (Chilvers & Lohurst, 2016).

Ce cadre conceptuel et la volonté de partir de "publics concernés" nous force à envisager une démarche où les modalités de la recherche et celles de l'action puissent s'alimenter mutuellement. Elle passe par des collaborations directes entre des scientifiques et des acteurs et a été théorisée dès 1946 par Kurt Lewin. Ce paradigme de recherche-action couvre aujourd'hui un ensemble très vaste et protéiforme de pratiques (Dubost, 1987; Liu, 1997 ; Chevalier & Buckles, 2013). En reprenant la catégorisation de Chevalier et Buckles, nous pouvons distinguer cinq grandes aires de mise en pratique de cette démarche : les interventions dans les organisations ; la psychosociologie française ; les pratiques innovantes de développement local et communautaire ; les pédagogies critiques inspirées des travaux de Freire et de Fals-Borda et les sciences citoyennes. Cette dernière catégorie est en plein renouveau, d'une part par les développements actuels des technologies numériques, mais aussi par les degrés d'implication des acteurs non-professionnels de la recherche (Bocquet, 2018). Aujourd'hui la recherche-action déborde très largement les sciences humaines et sociales et constitue un nouveau paradigme de recherche pour la médecine, l'agronomie, l'écologie, le numérique pour ne citer que les principaux domaines concernés.

La visée de cette démarche réactualisée est triple : connaissance, action et développement du pouvoir d'agir (*empowerment*) par la participation et se traduit par l'expression contemporaine de Recherche Action Participative (RAP). Les travaux actuels de Chevalier et Buckles (2013) répondent à cette intention et se traduisent sur le plan technique en « moyens habiles » qui combinent l'exploration rigoureuse des problèmes (*evidence based*) et la construction d'un accord entre les parties prenantes (*people based*). Ces moyens habiles couvrent un large panel d'intervention allant de l'animation du collectif de recherche, la répartition du travail de collecte de données, les analyses collectives des résultats et l'élaboration de leurs interprétations. L'articulation entre les trois visées de la recherche, de l'action et de la participation fait l'objet de nombreuses études en particulier pour le traitement de problématiques sociotechniques (Blangy & al., 2018).

Conclusion

Le changement climatique du système terre est aujourd'hui reconnu par l'ensemble des États de la planète. Cette reconnaissance s'appuie, notamment, sur le mode original des synthèses des résultats des recherches relatives aux

14 <https://www.institutmomentum.org/breves/bioregion-2050-lile-de-france-apres-leffondrement/>

évolutions du climat, réalisées périodiquement par le GIEC. Les recherches permettent d'élaborer des modélisations qui contribuent à l'identification et la quantification de facteurs participant au changement climatique. Ces modèles servent également, à la demande du GIEC, à proposer des scénarios pour le futur, en particulier des scénarios pour le XXI^e siècle. Cependant, ceux-ci restent très incertains. En effet, les paramètres du système-Terre (biosphère, océans, sols, climat...) sont nombreux, créant un système complexe qui comporte de multiples boucles de rétroaction et dont, au-delà de quelques décennies, l'évolution d'ensemble présente d'importantes inconnues. Parmi les facteurs qui pourraient influencer fortement le changement climatique mais dont les évolutions futures restent scientifiquement peu prévisibles, figurent les émissions naturelles de méthane (pergélisol, hydrates de méthane, micro-organismes méthanogènes...) qui pourraient être amplifiées, rendant le phénomène du changement climatique potentiellement incontrôlable. Au sein de ce système-Terre, les sociétés humaines sont aussi un système complexe soumis au passage d'un état relativement stable à un nouvel état largement imprévisible - tant par essence que par un manque de connaissances appropriées, qui demande des recherches transdisciplinaires nourries des concepts (interactions, boucles rétroactives, bifurcations, émergences...) et des méthodes de la pensée du complexe.

La sortie des énergies fossiles est une priorité de première importance qui crée une situation de transition énergétique inédite et dans laquelle le solaire, sous toutes ses formes, ne pourra qu'être un axe de développement prioritaire. La nécessité d'un croisement des différents enjeux, la complexité des interactions et la diversité des contextes requièrent de comprendre l'énergie solaire comme une voie à emprunter selon des chemins pluriels, tenant compte des caractéristiques des systèmes énergétiques locaux et des ressources territoriales et prenant en considération la part d'imprévisibilité que ne saurait gommer un vain calcul quantifiant les coûts ou gains humains, environnementaux, géopolitiques et démocratiques de la sortie des énergies fossiles pour l'ensemble de l'humanité. La question de l'appropriation citoyenne de cette bifurcation sociotechnique souligne l'importance de connaître et d'évaluer socialement, écologiquement et géopolitiquement des expériences pionnières comme celles du solaire thermodynamique de basse température sur laquelle s'attarde le présent dossier. 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 :

- Aykut S. C. et A. Dahan A. (2015). *Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales*. Paris : SciencesPo, Les Presses.
- Barnola J.M., Raynaud D., Korotkevich Y.S. & Lorius C. (1987). *Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂*. Nature volume 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 Dimitri Uzunidis Ed., *Recherche académique et innovation. La force productive de la science*. Peter Lang, pp. 203-250.
- Bocquet B. (2019), " Recherche participative, éléments d'une démocratie technique délibérative ", dans *Démocratie technique*, Lamard P. et Lequin Y. Eds, Editions Université Technologique de Belfort-Montbéliard, à paraître.
- Bonneuil C. et Fressoz J.B. (2013). *L'événement Anthropocène, La Terre, l'histoire et nous*. Paris.Paris : Le Seuil.
- 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.
- Caille F. (2020). " Sortir des pensées (et des carburants) fossiles ? Éduquer aux énergies et à l'Économie sociale et solidaire ". In *Comment former à l'économie sociale et solidaire*. Edition Presse Universitaire de Rennes, à paraître.
- Cailloce L. (2015). *Pergélisol, le piège climatique*. Journal du CNRS. Janvier 2015.
- 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.
- Chevalier J.M., Buckles D. J. (2013), *Participatory Action Research - Theory and methods for engaged inquiry*. London and New-York, Routledge.
- 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, Vol.18.
- Commission européenne (2000). *Communication de la Commission sur le recours au principe de précaution*. Bruxelles. 2 février 2000.
- Debeir J.C., Deléage J.P., Hémerly 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 *Transition énergétique, changement de société*. Delepouve M. (Coord.), Paul Antoine A. F., Simon J. C., Benatouil M. Paris : Éditions du Croquant.
- Dewey J. (2010). *Le public et ses problèmes*. Paris : Gallimard.
- Dubost J. (1987). *L'intervention psychosociologique*. Paris : PUF.
- 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. 10 juin 2019.
- Floyd M. (2014). *SAR11, oceans' most abundant organism, has ability to create methane*. Oregon State University (OSU). News and Research Communications. 7 juillet 2014.
- Friedman Y. (1984). *Alternatives énergétiques ou la civilisation paysanne modernisée. Pour une réelle économie des ressources : comment désindustrialiser l'énergie*. 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 CO2 and orbital forcing changes over the last climatic cycle*. Nature volume 329, pp. 414-418.
- GIEC. (2013). *5e rapport d'évaluation*. Groupe de travail 1.
- GIEC. (2014). *5e Rapport d'évaluation*. Synthèse, Résumé à l'intention des décideurs.
- GIEC. (2018). *Rapport spécial sur un réchauffement global de 1,5°C*. Résumé à l'intention des décideurs, version en Anglais.
- Global Carbon Project (2019). *Global Carbon Atlas*. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CH4-emissions>.
- Guarnieri F., Sébastien Travadel S. (2018). *Un récit de Fukushima - Le directeur parle*. Paris. Presses Universitaires de France - PUF.
- Guespin J. (2019). *Complexité, dialectique et émancipation*. Paris : Éditions du Croquant.
- Guespin-Michel J. (2011). *Les bactéries, leur monde et nous*. Paris : Dunod.
- 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.
- Heigl F., Kieslinger B., Paul K. T., Uhlik J., Dörler D. (2019). *Toward an international definition of citizen science*. PNAS, 116(17), 8089-8092.

- Illich I. (1973). *Energie 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* volume 329, pp. 403–408.
- Labussière O., Nedai A. (2018). *Energy transitions, a socio-technical inquiry*. Hampshire : Palgrave Macmillan.
- Lequin Y. C, Lamard P. (2014). *Éléments de démocratie technique*. Belford : Presses de l'Université de Technologie de Belford-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
- Liu M. (1997). *Fondements et pratiques de la recherche action*. Paris : l'Harmattan.
- Malm A. (2017). *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*. Paris, La Fabrique Editions.
- Mandon S. (2017). *Défis environnementaux émergents*. APORS Editions/Prospective et stratégie. Numéro 8.
- Masson-Delmotte. (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 *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.
- Shakova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ô. *Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf*. *Science*. 5 mai 2010.
- Topçu S. (2013). *la France nucléaire. L'art de gouverner une technologie contestée*. Paris : Seuil.
- Winner L. (2002). *La baleine et le réacteur. A la recherche de limites au temps de la haute technologie*. Paris : Charles Léopold Mayer et Descartes et Cie.