

## Vie de la recherche – Research news

# Pour une science de la transition énergétique au service de la société. Rapport d'un groupe de travail interdisciplinaire de la cellule énergie du CNRS

Xavier Arnauld de Sartre<sup>1,\*</sup>, Frédéric Wurtz<sup>2</sup>, Christophe Bouneau<sup>3</sup>, Freddy Bouchet<sup>4</sup>, Gilles Debizet<sup>5</sup>, Lise Desvallées<sup>6</sup>, Marie Forget<sup>7</sup>, Nathalie Kroichvili<sup>8</sup>, Sandrine Mathy<sup>9</sup>, Anne-Cécile Orgerie<sup>10</sup>, Dominique Pécaud<sup>11</sup>, Jacques Py<sup>12</sup>, Olivier Vidal<sup>13</sup> et Sébastien Velut<sup>14</sup>

<sup>1</sup> Géographie, CNRS, UMR TREE, Pau, France

<sup>2</sup> Génie électrique, CNRS, UMR G2ELAB, Grenoble, France

<sup>3</sup> Histoire, Université Bordeaux-Montaigne, UR CEMMC, Bordeaux, France

<sup>4</sup> Physique statistique, CNRS, UMR LMD, Paris, France

<sup>5</sup> Aménagement et urbanisme, Université Grenoble-Alpes, UMR PACTE, Grenoble, France

<sup>6</sup> Géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour, UMR TREE, Pau, France

<sup>7</sup> Géographie, Université Savoie – Mont-Blanc, UMR EDYTEM, Chambéry, France

<sup>8</sup> Aménagement de l'espace et sciences économiques, Université Marie-et-Louis-Pasteur, Institut FEMTO-ST, Belfort, France

<sup>9</sup> Économie de l'environnement, CNRS, UMR GAEL, Grenoble, France

<sup>10</sup> Informatique, CNRS, UMR IRISA, Rennes, France

<sup>11</sup> Philosophie, Université de Nantes, UR CERREV, Caen, France

<sup>12</sup> Psychologie sociale, Université de Toulouse, UMR CLLE, Toulouse, France

<sup>13</sup> Géologie, CNRS, UMR ISTERRE, Grenoble, France

<sup>14</sup> Géographie, IRD, UMR CREDA, Paris, France

Ce texte reprend de larges extraits d'un rapport<sup>1</sup> rédigé à la demande de la cellule énergie du CNRS<sup>2</sup> dont l'objectif était, quant à la question de la transition énergétique, d'échanger sur l'état de l'art, de décloisonner les thématiques énergie et de faire émerger des problématiques communes, d'établir des feuilles de route à 2030, de définir de nouveaux défis et d'y répondre et de proposer des textes d'appel à projets collaboratifs ciblés impliquant plusieurs disciplines en faisant contribuer davantage les sciences humaines et sociales : pour la circonstance, des extraits de ce rapport ont été ici réassemblés et partiellement modifiés.

La Rédaction

**Résumé** – La recherche sur la transition énergétique pose plusieurs défis de taille : c'est une recherche orientée problème (celui de la décarbonation du mix énergétique), qui doit être résolument éthique et intégrer dès sa formulation des principes de justice sociale et environnementale..., et ce alors même que la notion de transition est problématique en cela qu'elle donne l'impression que le processus qui mènera aux changements attendus – si changements il y a – sera linéaire et fondé sur la substitution d'une source d'énergie par une autre. Partant de ce constat, ce texte dresse des pistes de recherche sur des thématiques saillantes, notamment sur les acteurs et échelles des transitions, les techniques et leurs externalités, les

\*Auteur correspondant : [xavier.arnauld@cnrs.fr](mailto:xavier.arnauld@cnrs.fr)

<sup>1</sup> Arnauld de Sartre X., Wurtz F., Bouneau C., Bouchet F., Debizet G., de Fontenelle L., Desvallées L., Forget M., Kroichvili N., Mathy S., *et al.*, 2023. *Pour une science de la transition énergétique au service de la société*. Rapport, cellule énergie du CNRS, <https://shs.hal.science/halshs-04594804v1/document>.

<sup>2</sup> <https://celluleenergie.cnrs.fr/>.

modèles économiques et sociaux qui permettent de guider l'action, les modèles de consommation et de production, et il s'interroge sur les rapports entre consommation et production. Il défend *in fine* l'idée que la recherche, forcément interdisciplinaire et réflexive, a un rôle fort à jouer pour fonder l'action en matière de transition sur des constats scientifiquement fondés.

**Mots-clés** : transition énergétique / interdisciplinarité / recherche impliquée / programmation de la recherche / modèles économiques et sociaux

**Abstract – For a science of energy transition in the service of society. Report from an interdisciplinary working group of the CNRS energy unit.** Research on the energy transition raises a series of major challenges: it is a problem-oriented field of research (that of decarbonising the energy mix), which must be resolutely ethical and include principles of social and environmental justice from the very beginning... and this despite the problematic nature of the notion of transition which gives a misleading notion of the process that will lead to desired changes — if there are any. Taking this observation as its starting point, this paper sets out a number of avenues for research into key issues. It begins by examining the way in which the energy transition is transforming the interplay between actors in the energy sector and the scales at which decisions are taken and implemented. While inviting to take account of the wide variety of national contexts and levels of development, the article acknowledges the certainties and uncertainties surrounding the composition of the energy mix. It also stresses the importance of taking account of the externalities of technological choices, particularly in environmental terms. This enables us to draw up a research agenda focusing not only on the spatial aspects of transitions, but also on the ways in which economic models need to incorporate new parameters and new constraints. The article also invites to consider how the relationship between energy production and consumption is changing, and how consumption needs to be reduced. In so doing, the article defends the idea that research, which is necessarily interdisciplinary and reflexive, has a strong role to play in basing transition action on scientifically sound findings.

**Keywords:** energy transition / interdisciplinarity / engaged research / research programming / economic and social models

## **Introduction : analyse, questions et structuration pour une science de la transition énergétique au service de la société**

Les transitions énergétiques constituent un défi scientifique : à la fois un défi technique, politique, social, écologique, économique, éthique... C'est également une question aux implications très importantes pour les scientifiques : une injonction collective dont le contenu ne peut être défini, y compris en termes technologiques, sans susciter débats et controverses. L'étude des transitions appelle des approches systémiques, transdisciplinaires, orientées problème et réflexives, voire critiques.

Ce constat a servi de base à la rédaction d'un rapport pour orienter les recherches sur les transitions énergétiques, commandé par la cellule énergie du CNRS – rapport dont émane ce texte. Notre objectif principal est ici de fonder l'assertion ci-dessus et d'en tirer les conséquences en matière de thématiques de recherche à aborder et de modes d'organisation de la recherche.

Ce rapport commence par identifier quelques enjeux-clés de la recherche sur les transitions énergétiques, enjeux qui permettent d'identifier des thématiques peu traitées qui paraissent devoir être abordées

prioritairement. Cela nous permettra, *in fine*, de faire des propositions d'organisation de la recherche pour évoquer ces enjeux.

## **L'étude des transitions énergétiques doit être systémique, transdisciplinaire, réflexive et mue par des objectifs de justice et d'éthique**

### **Les transitions, un processus qui ne saurait être linéaire et piloté**

Dans le contexte du réchauffement climatique et d'effondrement de la biodiversité, envisager les transitions, notamment énergétiques, comme mégaprojet se voulant rationnel et pacifique parce qu'universellement applicable devrait s'imposer comme une exigence pour maintenir une planète habitable. Il n'en est pourtant rien quand on s'attache aux impensés, voire aux intentions, que véhicule la notion de transitions.

Les transitions énergétiques – nous parlons au pluriel parce qu'elles sont diverses dans leurs formes, selon les contextes, les temporalités – dont il est question ici se veulent écologiques, et, comme tout changement sociétal, elles visent un mouvement interactif aux

multiples transformations. Partant d'une situation de fait, elles cherchent à concevoir et mettre en œuvre des systèmes d'action dont les parties constitutives seront suffisamment accordées pour permettre d'atteindre de nouvelles cohérences. Du fait de l'inertie de choix passés (notamment en matière d'investissement dans les infrastructures) et comme toute transformation impliquant des institutions humaines (organisations formelles ou habitudes de pensée et d'action), assorties de rapports de pouvoir et de formes de résistance au changement, les transitions énergétiques font face à des verrouillages (*lock-in*) dans le cadre d'un processus de dépendance à la trajectoire (*path dependency*). Même en poursuivant une intentionnalité d'action (et donc une finalité), du fait de la multiplicité des acteurs (et donc des finalités), des interactions, des niveaux d'action ainsi que d'une articulation avec des dynamiques issues de la trajectoire passée, les résultats ne seront pas entièrement ceux projetés par les acteurs. Ainsi, aucune transition n'est un processus téléologique et la maîtrise de la trajectoire n'est que très partielle, sans toutefois être aveugle, c'est-à-dire hors de contrôle.

De ce fait, les transitions présentent toujours des moments de tension et de résolution (ou non) de ces tensions (avec des effets de cliquet lorsque des décisions collectives sont prises); même si elles se déploient dans la durée, elles ne peuvent être graduelles, au sens de maîtrisées et douces.

### Enjeux de la période actuelle en matière de transitions énergétiques

Le contexte dans lequel se fait l'appel aux transitions est essentiel pour comprendre les enjeux des transitions. Il nous semble que ce contexte est marqué par cinq caractéristiques principales :

1. Les transitions énergétiques et environnementales n'ont pas de dynamique endogène propre. Ce sont les changements globaux qui impliquent de changer de système. Certes, les technologies qui accompagnent les transitions ont leur logique d'évolution, qui guide les transitions, mais le choix de ces technologies a été fait pour répondre aux enjeux climatiques.

2. Les transitions énergétiques sont à penser dans le cadre de l'Anthropocène et d'un monde fini. La finitude se retrouve à de multiples niveaux : dans les conditions d'habitabilité des espaces exposés aux changements climatiques; dans la nécessaire intégration de la transition énergétique dans le contexte plus large de crise de la biodiversité; dans la remise en cause du modèle de production et de consommation qui a provoqué l'entrée dans l'Anthropocène; et dans la disponibilité et la localisation de matériaux pour construire les technologies de transition...

3. Même si des débats forts questionnent la place que la technique doit avoir dans les transitions, celles-ci ont indéniablement une dimension technique, mais on ne peut pas prévoir de façon déterministe ces bases techniques, dans leurs potentiels et innovations, comme dans leurs limites. Les techniques sont, pour une part, imprévisibles et incertaines, tout en étant soumises à des règles et à certaines limites dont la thermodynamique et la disponibilité des ressources.

4. La question des transitions énergétiques est éminemment spatiale, pour trois raisons au moins. D'abord, parce que tous les pays et territoires n'ont pas les mêmes besoins en énergie. Ensuite, parce que les énergies renouvelables invitent à repenser l'organisation spatiale de l'énergie: il ne s'agit plus simplement de capter ou produire en quelques lieux pour transporter et diffuser l'énergie, par de grands réseaux, mais de multiplier les sources de production au plus près des lieux de consommation. De ce fait, l'impact spatial des transitions énergétiques est bien supérieur à celui des systèmes fossiles et nucléaires, que ce soit en quantité d'espace nécessaire ou en localisation des lieux de production.

5. Enfin, l'énergie étant un secteur hautement stratégique, les transitions énergétiques ont une dimension géopolitique forte. Elles ne sauraient s'abstraire des débats autour de la souveraineté énergétique, en termes de maîtrise des technologies, des sources d'énergie ou des matériaux qui permettent de produire l'énergie.

### Principes de justice et d'éthique qui doivent guider les transitions

La mise en œuvre des transitions ne saurait se passer de considérations d'éthique et de justice.

Plusieurs approches de la justice existent, notamment la justice climatique, la justice spatiale, etc. En matière spécifiquement énergétique, le courant dit de la justice énergétique est bien stabilisé à l'échelle internationale. Ce courant amène à considérer que la justice énergétique doit se déployer tout au long de la chaîne énergétique (de la capture au rejet en passant par des étapes usuellement appelées production et consommation) et doit respecter les cinq dimensions de la justice: distributive (répartir équitablement les coûts et les bénéfices des transitions), procédurale (respecter les procédures légales), restaurative (compenser les pertes), existentielle (reconnaître les droits des personnes) et cosmopolitique (avoir une pensée globale des transitions).

Les transitions énergétiques posent ainsi des questions éthiques: en effet, tous les scénarios de transition impliquent d'en passer par une forme de sobriété et d'autolimitation, qui permet d'arriver à l'idée de finitude

et de partage des ressources. Comment fonder éthiquement cette autolimitation ? Cela passe par le respect de cinq grands principes éthiques :

1. principe d'autonomie qui consiste dans le respect de la singularité et de l'intégrité de la personne, de sa liberté d'action et de sa liberté de choix, pour autant qu'elles ne portent pas atteinte au droit d'une autre personne de choisir ou d'agir ;

2. principe de justice, notamment dans le partage des bénéfices, des coûts des transitions et, donc, de la pénurie énergétique à l'échelle planétaire ;

3. principe de bienfaisance ou de bienveillance qui consiste à maintenir le bien-être des personnes, comme se chauffer en hiver, bénéficier d'une température clémente en été, se déplacer ;

4. principe de non-malfaisance (ne pas nuire) qui consiste à ne pas causer de préjudice intentionnel ou à éviter de participer à un comportement comportant un risque de préjudice ; les objectifs visés par les transitions ne sauraient se montrer aveugles aux conséquences négatives de la décision que l'on prend pour atteindre ces objectifs, notamment pour les générations futures ;

5. principe de fidélité qui suggère la fiabilité, le respect des promesses et la loyauté.

Ces éléments sur la définition des transitions dessinent ce que doit être une recherche sur les transitions énergétiques : elle doit être systémique, notamment parce qu'elle s'inscrit dans un monde aux ressources limitées, guidée par des principes de justice et d'éthique ; elle doit en outre être réflexive, c'est-à-dire qu'elle ne doit pas être dupe de ses propres catégories.

## Proposition de thématiques de recherche

La définition d'un cadre théorique pour penser la conception et la mise en œuvre des transitions est un enjeu majeur. Mais les facteurs de complexité, dont nous venons d'esquisser la liste, sont tellement nombreux que force est de constater qu'aucun grand cadre de pensée ne peut, à lui seul, analyser de façon englobante les transformations en cours. La focale de la conception des transitions énergétiques s'est déplacée vers des points saillants qui, pour l'essentiel, transcendent les disciplines : sobriété, flexibilité, résilience, régulation, autonomie et dépendances, communautés énergétiques, approches *low-tech*, conventions marchandes, justice énergétique, faisabilité sociotechnique des innovations, reconfiguration, scénarisation, adaptation des pratiques ou des comportements. L'enjeu, à ce stade, est sans doute d'être capable d'articuler des cadres de pensée. Cette

articulation devra être attentive aux principales thématiques ci-dessous mentionnées.

## Acteurs et échelles des transitions

Les transitions énergétiques élargissent le nombre et diversifient les types d'acteurs impliqués par rapport à un fonctionnement sans transition, notamment parce que les transitions deviennent un enjeu commun, qu'elles modifient les pratiques, redistribuent les coûts et les accès à l'énergie et créent également des opportunités pour la participation politique et l'innovation technologique. Cet élargissement du spectre des acteurs et les incertitudes ont pour conséquence une repolitisation des sujets énergétiques. Il ne s'agit plus seulement de thèmes laissés à des « experts » ; ils donnent lieu à un investissement de la part de collectifs citoyens, des médias, des organismes, etc. Ils posent donc des questions relatives au fonctionnement des débats et des controverses, dans différents cadres politiques, et à la constitution des agendas politiques.

Ces changements des acteurs impliquent également un changement des échelles dans lesquelles se déploient les transitions.

- Les coalitions d'acteurs diffèrent entre grands blocs économiques, tout comme la façon de comprendre les transitions et les potentialités (notamment économiques) qui y sont associées.
- Le rôle joué par l'État est en pleine recomposition : alors qu'il s'affiche comme le garant et le prescripteur dominant, il compose avec les acteurs en place ou émergents en fonction de positions idéologiques qui varient selon les gouvernements.
- La question du rôle que peuvent jouer les territoires subnationaux dans la définition et la mise en œuvre des transitions se pose également, sachant qu'ils ne peuvent être réduits à des espaces de déclinaison des prescriptions de l'État.
- Le rôle joué par des acteurs émergents, dont le citoyen, passant du rôle passif de consommateur à celui de consoproducteur (ou de consommateur) de façon individuelle ou collective, est à éclairer.

Enfin, le déploiement massif des énergies renouvelables, la décarbonation des transports et d'autres transformations que pourrait nécessiter l'objectif de neutralité carbone affecteront substantiellement les secteurs économiques associés aux énergies fossiles. Ceux-ci pourront aussi faire émerger de nouvelles polarités de pouvoir et de nouvelles activités autour de la gestion des énergies – sans compter qu'évidemment, des questions essentielles en matière d'emplois se posent.

## Techniques et matérialités des transitions

Les énergies renouvelables reposent certes sur des flux naturels, mais ces derniers, pour être transformés en énergie utilisable par l'homme, nécessitent le recours à des technologies qui ont besoin, pour être construites, de matériaux – qui se trouvent en quantités limitées. En outre, le métabolisme socio-économique des sociétés modernes repose sur l'existence d'une infrastructure dont le déploiement augmente avec le niveau économique. La construction et le fonctionnement de cette infrastructure demandent de nombreuses ressources.

La question est de savoir jusqu'où l'on peut augmenter ces ressources, comment les substituer ou limiter leur usage. Quelle sera la demande future en ressources pour les scénarios de transition énergétique anticipés ? Où trouver ces ressources ?

Ces questions renvoient à deux autres questions tout aussi cruciales :

- Le progrès technologique, permet d'être plus efficace et donc de diminuer les coûts d'extraction. Il permet aussi de remplacer à coût constant des ressources de haute qualité (gisements concentrés et facilement accessibles) par des ressources de moins bonne qualité, mais plus abondantes, ce qui donne l'illusion de l'abondance croissante. Mais une amélioration infinie est impossible, car il existe des limites physiques (thermodynamiques), qui ne peuvent pas être dépassées. Quand elles sont atteintes, le remplacement de ressources de haute qualité par des ressources de moins bonne qualité ne peut plus être compensé par l'amélioration technologique. Les impacts environnementaux et les coûts de production augmentent irrémédiablement, en limitant l'accessibilité. Il est alors nécessaire de trouver des ressources « non conventionnelles », dont l'impact environnemental de l'extraction peut être plus important que celui des conventionnelles.
- Pour satisfaire la demande en ressources des pays les moins bien dotés, ces ressources sont importées depuis des pays mieux dotés et/ou pouvant produire à plus faible coût. Les impacts environnementaux (et sociaux) sont alors exportés. Si ces pays ont des conditions de production environnementales et sociales moins vertueuses, cela peut oblitérer l'effort de décarbonation. Il faut estimer les impacts de la demande nationale sur le lieu de prélèvement (en privilégiant une approche par cycle de vie, différente de l'approche qui consiste à estimer un impact direct), en considérant les chaînes énergétiques de la capture au rejet.

Il est nécessaire de bâtir des modèles capables de reproduire les évolutions passées par pays et qui font le

lien entre la demande en infrastructures pour produire des services à la société en fonction de son niveau de vie, la demande en ressources, la qualité décroissante de ces ressources avec la production, le progrès technologique, le coût de la production primaire (et de recyclage pour les métaux) et les impacts environnementaux. Cela donne une évolution tendancielle, qui est la condition pour ensuite bâtir des scénarios raisonnables pour le futur et éviter tout narratif hors-sol.

## Externalités liées à la respatialisation des énergies

La complexité de relations entre les différentes dimensions des transitions se lit quand elles se territorialisent. L'espace influe directement ou indirectement sur les scénarios des transitions, en fonction des territoires, de leurs ressources financières, matérielles et immatérielles, des conditions du marché, des conditions initiales de chaque territoire et des équilibres géopolitiques entre eux et entre grands blocs continentaux, États et territoires infranationaux.

Dans les pays du Sud, la discussion sur les transitions énergétiques est indissociable de celle sur l'accès à l'énergie, au sens des objectifs du développement durable (pour la consommation des ménages, l'éducation, mais aussi pour de nouveaux besoins : climatisation, numérique), avec comme but de résorber la précarité et la pauvreté énergétiques. Pour de nombreux pays, les voies de transition énergétique passent d'abord par l'accroissement de la disponibilité en énergie et donc la mobilisation de ressources et les aménagements dans les territoires pour y accéder et les mettre en valeur. Apporter des solutions à ces différentes problématiques est essentiel pour ne pas reproduire dans le Sud les modèles énergétiques dont le Nord ne voudrait plus pour lui-même.

Dans les pays largement développés, la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables et l'électrification annoncée de la mobilité, des secteurs de l'industrie et du bâtiment, réouvrent le champ des possibles en matière de localisation des convertisseurs énergétiques sources d'énergie : des grappes de grands parcs éoliens ou solaires d'une puissance similaire à celle d'une centrale nucléaire à une autoproduction généralisée (du moins dans l'habitat individuel) couplée avec les batteries de véhicules électriques en passant par des échelles spatiales intermédiaires de coordination de l'offre et de la production. Ces visions du futur appellent des analyses des transformations historiques et contemporaines des réseaux et, plus largement, des systèmes énergétiques, qu'ils soient électriques, thermiques ou autres. L'autonomisation énergétique de collectifs intermédiaires, de type communautés énergétiques, démultiplie les possibilités d'inves-

tissement et de réappropriation de l'énergie, mais elle questionne la fiabilité et la solidarité du système global, si tant est que puisse être qualifié de « global » un système énergétique. En même temps, si l'autonomie énergétique peut être atteinte et doit même être atteinte pour certains (typiquement dans le cas des sites isolés), elle ne doit pas donner à espérer le mythe d'une autonomie pour tous qui serait trop « chère », car non optimale économiquement et environnementalement et inatteignable en termes de ressources. Le tout ouvre en fait la question de la recherche du juste équilibre entre autonomie et interconnexion permettant les échanges (typiquement des flux d'énergie localement et temporellement en déficit ou en excès) et la mutualisation (typiquement l'installation de stockages ou de services de cogénération qui peuvent trouver un intérêt à être mutualisés à une certaine échelle).

Ces questions s'élargissent au rôle des différentes autorités territoriales dans la planification et la régulation de l'énergie, et, ce faisant, aux formes de la démocratie. Alors que la neutralité carbone nécessite davantage de sobriété dans la conduite des activités humaines dans les pays du Nord, des liens commencent à être établis entre le passage à des pratiques plus sobres en énergie, la disponibilité des infrastructures et la contribution aux décisions collectives et publiques. La sobriété semble d'autant plus choisie que les deux dernières conditions sont réunies en plus de la conscience écologique. Elle s'avère contrainte dans les situations contraires.

### **Modèles économiques, techniques et sociaux des transitions**

L'atteinte de la neutralité carbone en quelques décennies devient le nouvel horizon de la modélisation, ce qui entraîne des modifications importantes dans l'analyse des stratégies de transition. Les modèles, qu'ils soient à dominante économique ou à dominante technologique, sont bien mieux adaptés à la description de changements progressifs et « à la marge » qu'à la description de changements systémiques ou « disruptifs ». Trois éléments peuvent être pris en compte :

- Les politiques incitatives ne seront pas suffisantes. Des dispositifs réglementaires ciblés sur les acteurs, que ce soit tout autant les investisseurs, les fournisseurs ou les concepteurs que les consommateurs, seront nécessaires.
- Des dimensions physiques et techniques de l'énergie doivent être prises en compte, mais également d'autres dimensions de la transition énergétique, dans leur potentiel et dans leurs limites. D'un point de vue économique, là où la seule considération des énergies marchandes pouvait être jusqu'alors adaptée (dans un mix essentiellement fossile et fissile), les paysages des transitions énergétiques devront laisser une large place dans la modélisation aux nombreuses

énergies consommées ou produites non marchandes (apports solaires ou géothermiques, autoconsommation, récupération d'énergie fatale). Il s'agira alors de combler le fossé entre énergies utiles et énergies marchandes en donnant leur place dans la modélisation aux premières par rapport aux secondes.

- Enfin, ces modèles présupposent également une homogénéité des situations spatiales et territoriales, ce qui n'est bien sûr pas conforme à la réalité. Il est alors impossible de renseigner les spécificités locales et les conséquences sur chaque territoire en termes de déploiement pertinent, et de représenter des communautés énergétiques locales dont certaines échappent d'ailleurs à la logique de marché.

Ensuite, dans un contexte mondial marqué par l'incertitude et la succession de crises, les gouvernements adoptent des politiques d'amortissement des chocs tendant à renforcer les *lock-in* technologiques, ce qui entre en tension avec les besoins de planification à long terme de la décarbonation. De nouveaux récits peuvent ainsi chercher à explorer les enjeux relatifs à la vulnérabilité de nos systèmes et les opportunités de bifurcation.

Enfin, une littérature de plus en plus fournie tend à montrer, à l'échelle planétaire au moins, que les cobénéfices des politiques climatiques sont supérieurs aux coûts de la décarbonation, alors que des effets adverses peuvent également survenir. De nouvelles approches enrichissant les notions de coûts marginaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre par les cobénéfices et les effets adverses pourraient être explorées.

### **Conception de modèles de production/consommation**

Une approche de modélisation pour la conception, l'optimisation et la supervision des systèmes énergétiques à l'interface des acteurs sociaux et des contraintes techniques et physiques des systèmes énergétiques est nécessaire pour réduire les impacts de la consommation d'énergie.

Dans un scénario d'augmentation de la pénétration d'énergies renouvelables variables et intermittentes et de développement des systèmes énergétiques distribués, l'optimisation de la conception et du pilotage des systèmes énergétiques interconnectés (gaz, électricité, chaleur) en réseau sont des enjeux majeurs.

Les verrous portent :

- sur les aspects numériques : traitement de données massives pour aboutir à des représentations fiables de la demande, des marchés de l'énergie locaux et globaux (électricité, gaz, chaleur) ;

- sur les aspects énergétiques techniques et physiques : intégration de la dynamique et des contraintes des systèmes énergétiques dans les problèmes d’optimisation, parfois sur différentes échelles de temps, pour prendre en compte les dynamiques de stockage de l’énergie ;
- sur le recueil de données, dans un objectif d’interaction et d’interopérabilité avec les acteurs sociaux concernés (des consommateurs aux gestionnaires de réseaux) par les systèmes énergétiques, impliquant évidemment des problématiques de protection des données personnelles ou de modalités d’accès et de partage d’informations qui peuvent être sensibles du point de vue de la criticité des installations ou des jeux concurrentiels d’acteurs dans le cadre du système sociotechnique énergétique.

L’objectif serait de fournir des outils de conception, de diagnostic, de contrôle et d’aide à la décision aux acteurs (particuliers, collectifs, collectivités, entreprises, gestionnaires de réseaux...) pour qu’ils puissent ajuster leur consommation, en adéquation avec la production d’énergies renouvelables intermittentes, en considérant le potentiel des systèmes multi-énergies. Il s’agirait ainsi de traiter des enjeux comme la sobriété et la flexibilité de la demande en plus du stockage, le tout pouvant être en interaction avec l’organisation de la mobilité et les questions de qualité de l’air et de santé.

### **Pratiques de consommation d’énergie à l’aune des transitions et des chocs**

La modification des pratiques de consommation est essentielle dans tous les scénarios de transition énergétique, même les plus conservateurs. Les études de consommation d’énergie montrent comment ces pratiques ne sont pas immanentes, dépendantes de besoins moyens que l’on pourrait définir *in abstracto*, mais qu’elles résultent fortement de l’offre et de la disponibilité de l’énergie, des équipements à disposition, ainsi que – et c’est sans doute un facteur crucial – des normes sociales communément admises du niveau d’énergie souhaitable. Ainsi, la théorie des pratiques met l’accent sur la construction sociale des besoins d’énergie, que sous-estiment les scénarios de transition énergétique élaborés par les modélisateurs ; les changements de la demande pourraient s’avérer plus malléables que le déploiement d’infrastructures lourdes.

Trois types de comportements peuvent notamment être approfondis :

1. L’accélération des transitions, voire des chocs sociaux, environnementaux et techniques, rend probable la survenue de chocs énergétiques, posant la question de la résilience des sociétés.

2. Les grands comportements de consommation peuvent être examinés. Deux grands leviers de modification de ces comportements sont possibles. La flexibilité, qui consiste à adapter la consommation d’énergie à l’énergie disponible, est un de ces leviers. La sobriété, qui consiste en une tempérance dans les comportements de consommation, est l’autre levier. Ces deux leviers peuvent être étudiés pour ce qu’ils impliquent.

3. Les changements des comportements de consommation appelés par les transitions posent des questions de gouvernance, d’éthique et de justice énergétique, qui se manifestent de différentes manières : conflictualité, retards, manque d’adhésion, etc.

### **Conclusion : méthodologie et propositions de structuration d’une recherche science-société pour les transitions énergétiques**

Ces pistes de recherche n’ont pas vocation à être exhaustives : elles montrent la diversité des dimensions mises en jeu par le sujet des transitions et posent des questions essentielles en matière de pratique de la recherche. Une des conséquences immédiates est qu’il est nécessaire de constituer des réseaux de recherche pérennes et interdisciplinaires portant spécifiquement sur ces thématiques. Dire cela, cependant, ne saurait résumer l’ensemble des enjeux. Quatre questions méritent, à ce niveau, d’être soulignées dans cette conclusion.

En premier lieu, le thème et l’enjeu des transitions énergétiques appellent la mise en œuvre d’une posture épistémologique qui mobilisera deux ressorts :

- la réflexivité sur les postures et les méthodes de recherche, ce qui est pertinent si on se remémore le fait que les acteurs de la recherche sont eux-mêmes des acteurs des transitions ;
- une approche d’ouverture scientifique, qui doit rester inclusive dans sa méthode et dans son contenu.

L’interdisciplinarité, qui constitue le deuxième enjeu que nous voulons relever en conclusion, vise à mobiliser des disciplines dont les méthodes et résultats relèvent de sciences légitimes qui se réclament du principe de la rationalité. Nous postulons, dès lors, que le champ des disciplines et connaissances sollicitées devrait enregistrer un enrichissement mutuel et croisé. Impérative pour accéder à une connaissance inaccessible à un raisonnement en silos, l’interdisciplinarité suppose de faire un pas de côté, de mettre en discussion l’intérêt commun pour favoriser la coopération entre chercheurs de disciplines différentes (sans instrumentalisation des unes par les autres). Cela implique aussi de faire un effort de pédagogie, d’accepter l’instrumentalisation de disciplines par une

autre, mais en veillant à la réciprocité sur le temps long, d'accepter que les temporalités sont différentes selon les disciplines et que les projets interdisciplinaires prennent davantage de temps.

Cette interdisciplinarité peut s'incarner dans des objets précis. En effet, l'étude des transitions énergétiques appelle à une science ouverte qui associe observation, recherche et action, autant dans les dimensions quantitatives que dans les dimensions qualitatives, avec une nécessité d'approches multi-échelles dans le temps et dans l'espace. Cette nécessité invite à convoquer des dispositifs de recherche appuyés sur des terrains qui iront du *living lab* au terrain réel en passant par des observatoires. Au-delà des enquêtes sur des terrains réels déjà largement pratiquées, le *living lab* offre des opportunités d'observation et d'expérimentation interdisciplinaires de dispositifs technologiques ou sociotechniques. Il est un lieu qui s'ancre dans un territoire et une histoire, et dans lequel se déploie une dynamique de transition opérée par des dispositifs et des acteurs à l'échelle 1/1, mobilisant ainsi des ressources, des leviers, et produisant des impacts. Les *living labs* pourront être des foyers, des bâtiments tertiaires, des entreprises, des territoires et des régions. Ils seront donc des lieux privilégiés d'expérimentation, qui pourront être instrumentés et susciter une mobilisation des parties prenantes, ce qui permet de commencer à mettre des dispositifs techniques novateurs à l'épreuve des représentations, voire des pratiques des humains. Les observatoires, se greffant sur ces *living labs*, ont vocation à s'emparer de la question des données, ingrédients fondamentaux de la démarche scientifique. Cela soulève des questions en matière de production de données quantitatives et qualitatives massives car l'approche « observation » et la collecte de données conjuguent les cultures et les nécessités des sciences de l'environnement, des sciences humaines et sociales et des sciences de l'ingénierie et de la matière, tout en respectant le règlement général sur la protection des données (RGPD) et les orientations de la science ouverte.

Les logiques de réflexivité, d'interdisciplinarité, d'observatoire et de *living lab* doivent impliquer tous les acteurs de la transition énergétique (citoyens, collectifs, collectivités, entreprises, États) dans une logique de science participative pour générer des

données d'ordre social, économique, physique, environnemental et technique. Ces données doivent permettre d'alimenter les outils d'analyse, de modélisation et de simulation, nécessaires à l'anticipation, à la planification et à la gestion, et ainsi au développement, à la confrontation et à la validation de ces mêmes outils par des données provenant du terrain.

Mais si l'interdisciplinarité doit aussi être pensée comme une coopération avec d'autres milieux de connaissance que la recherche scientifique, cette dernière doit tenir un rôle particulier dans ce processus, pour éclairer le mieux possible les débats dans une posture de neutralité, d'indépendance et de rationalité basée sur une approche contradictoire et collégiale. En effet, si le rôle des scientifiques est ainsi essentiel, force est de constater qu'il est très faible dans les débats nationaux sur l'énergie. La science, à notre avis, doit réinvestir ces questions, avec deux objectifs :

1. l'établissement des connaissances, la production de rapports scientifiques et de notes de synthèse qui font référence à la fois auprès des scientifiques, mais aussi auprès des autres acteurs : médias, politiques, organisations non gouvernementales, associations, etc.

2. la communication de ces connaissances, la capacité d'intervenir collectivement au titre de représentants de la communauté de recherche afin de diffuser les questions scientifiques autour de ces enjeux et ainsi éclairer le débat public.

Nous pensons qu'il serait nécessaire qu'une nouvelle instance nationale de l'énergie – par exemple sur le modèle du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) – soit mise en place. Si les acteurs participant à la production de ces connaissances vont au-delà des instituts de recherche publics, nous pensons que le monde académique devrait prendre en charge sa naissance et son organisation, et être ainsi garant de sa qualité scientifique et de son indépendance. Ainsi proposons-nous la création d'un Groupement national de l'étude de l'énergie qui aurait pour but de synthétiser les connaissances scientifiques dans le domaine de l'énergie, en regroupant les scientifiques académiques dans le cadre d'une synergie ouverte avec tous les acteurs qui produisent des savoirs non académiques.

**Citation de l'article** : Arnauld de Sartre X., Wurtz F., Bouneau C., Bouchet F., Debizet G., Desvallées L., Forget M., Kroichvili N., Mathy S., Orgerie A.-C., Pécaud D., Py J., Vidal O., Velut S., 2025. Pour une science de la transition énergétique au service de la société. Rapport d'un groupe de travail interdisciplinaire de la cellule énergie du CNRS. *Nat. Sci. Soc.* 33, 3, 339-346. <https://doi.org/10.1051/nss/2025060>