

Transition énergétique et nouveaux itinéraires de la matière

Préambule

En 2019, l'Université fédérale Toulouse Midi-Pyrénées (UFTMP) a mis en place six axes stratégiques, pouvant constituer des champs de recherche interdisciplinaires et fédérant des chercheurs issus des divers établissements et organismes du site toulousain. Ces axes stratégiques sont organisés autour de six groupes de travail constitués de chercheurs du site ayant souhaité s'y impliquer et issus de champs disciplinaires différents. Les réflexions menées dans ces axes peuvent donner lieu à la mise en place d'actions structurantes interdisciplinaires.

Pour chacun de ces six champs de recherche, les groupes de travail ont pour mission d'en identifier (a) les enjeux, (b) le périmètre scientifique et (c) les forces présentes sur le site.

Liste des membres du groupe de travail de l'axe 2 "Transition énergétique et nouveaux itinéraires de la matière" :

Ligia Barna (TBI, INSA) ; Alexandra Bertron (LMDC, INSA) ; Anne-Marie Billet (LGC, Toulouse INP) ; Sébastien Chevrot (GET, CNRS) ; Jean-Francois Georgis (LA, UT3) ; Pascal Guiraud (TBI, INSA) ; Romuald Poteau (LPCNO, UT3) ; Jacques Py (CLLE, UT2J) ; Sylvain Salvador (RAPSODEE, Mines-Albi) ; Bruno Sareni (LAPLACE, Toulouse INP), Laurent Selle (IMFT, CNRS) ; Philippe Serp (LCC, Toulouse INP), Étienne Snoeck (CEMES, CNRS), Marie-Gabrielle Suraud (CERTOP, UT3), Christophe Tenailleau (CIRIMAT, UT3) ; Olivier Vanderhaeghe (GET, UT3) ; Philippe Villedieu (Onera).

Le texte ci-dessous ne constitue que la première étape du travail du groupe de travail de l'axe stratégique N°2 "Transition énergétique et nouveaux itinéraires de la matière" correspondant à la définition des enjeux.

Les enjeux

Le mode de vie des pays industrialisés est profondément ancré dans l'utilisation de matières premières et d'énergie. Ce mode de vie repose néanmoins sur un stock de ressources épuisables et pose la question des déchets et rejets générés. Depuis de nombreuses années, il impacte fortement la santé et l'environnement, dont le climat. Dans ce contexte, des accords internationaux cherchent à diminuer ce type de conséquences notamment via les *CONférences of the Parties* « COP ».

La notion de développement durable (*sustainable development*) en 1987 (Rapport Brundtland) puis l'adoption de cette notion au Sommet de la Terre de Rio (1992) traduisent l'idée d'un nécessaire *aménagement* des façons de produire et de consommer (incluant les modes d'utilisation des ressources de matières et d'énergie), selon trois conditions normatives : efficacité (technologique et économique), équité (sociale) et protection (de l'environnement et de la santé).

L'institution de la transition écologique (2012, en France) marque un nouveau pas en affirmant la nécessité non plus seulement d'un *aménagement*, mais d'un processus de *transformation* des façons de produire¹, tout en respectant les trois conditions normatives précédentes. Le respect de ces conditions est devenu un impératif auquel la recherche académique doit apporter sa contribution. L'ambition est de faire émerger un cadre pour répondre aux différents défis d'une transition, qui doit favoriser un développement économique respectueux d'exigences universalisables telles que la protection de l'environnement, de la santé et l'amélioration des conditions de vie.

Avec la loi « transition énergétique pour la croissance verte », la France s'est engagée, en 2015, à contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique, à préserver l'environnement et à renforcer son indépendance énergétique, tout en garantissant un accès pour tous à l'énergie grâce à des coûts compétitifs.

Les objectifs de la politique énergétique de la France ont été réactualisés en 2019 au travers de la loi « Énergie-climat » pour pouvoir atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Cette nouvelle loi s'articule autour de quatre axes principaux :

- Sortie progressive des énergies fossiles et développement des énergies renouvelables,
- Lutte contre les passoires thermiques,
- Instauration de nouveaux outils de pilotage, de gouvernance et d'évaluation de la politique climatique,
- Régulation du secteur de l'électricité et du gaz.

La transition énergétique est la composante majeure de la transition écologique, en raison de la nécessité d'amoindrir les impacts des productions et consommations sur l'environnement, le changement climatique et la santé.

¹ Les « façons de produire » incluent l'intégralité du cycle de la production (de l'extraction des ressources jusqu'à la fabrication des produits en passant par les modes d'utilisation).

Le G2 propose que se développent des recherches croisées, appuyées sur les trois « piliers » de la transition énergétique et, plus largement, de la transition écologique.

Les trois **enjeux d'efficacité, d'équité et de protection** doivent être analysés et pris en compte simultanément dans les recherches académiques. Ce croisement permettra que les propositions d'évolution des modes de production, et plus généralement, les changements de paradigme dans ces domaines, appréhendent la complexité des *processus de transition*. Cela implique le développement d'approches inter-scientifiques et de modèles visant à réduire la complexité des questions énergétiques, de préservation des ressources, en relation avec les problématiques environnementales et climatiques posées à différentes échelles : internationale, nationale et locale. Dans la mesure où ces questions sont sociétales, à travers leurs dimensions technologiques, économiques et socio-politiques, les recherches doivent associer l'ingénierie, la physique, la chimie, les sciences de la Terre, l'écologie, l'agronomie, les sciences du vivant et de la santé dont la toxicologie et l'écotoxicologie, et les différentes disciplines des sciences humaines et sociales.

I. Enjeu efficacité

a. Efficacité technologique

Les ruptures technologiques requises par les transitions énergétique et industrielle doivent permettre la diminution des impacts, en répondant aux critères de la « sobriété carbone »², de la réduction des émissions et de la préservation des ressources naturelles.

Les évolutions technologiques accompagnant ces transitions doivent aborder les différentes étapes :

- i. de la production à la consommation d'énergie, que sont : les modes de captation de l'énergie primaire, ses modes de transformation, ses modes de stockage et de diffusion à partir des sites de production jusqu'aux utilisateurs et leurs modes de consommation,
- ii. de la consommation des ressources, de leur transformation, de leur utilisation et de leur recyclage dans une logique de circularité de la matière et de diminution des impacts, et ce dans l'industrie, l'agriculture, les transports, les bâtiments, etc...

Une seconde contrainte est de faire naître des alternatives permettant une transition *bas carbone* et sans rejets, évaluées à l'aune de leur capacité à satisfaire les besoins exprimés localement par les populations. Il est ainsi nécessaire de maîtriser les interconnexions entre les différents domaines (production d'énergie, accès à l'eau, alimentation, biens) par les flux physiques et les technologies associées pour assurer un équilibre territorial. Pour cela, il faut que ces nouvelles technologies assurent des niveaux de production et de consommation adéquats, qui vont augmenter à l'échelle mondiale pour répondre aux demandes de pays en fort développement.

Par exemple, avant la crise sanitaire de 2020, l'agence mondiale de l'énergie estime que cet accroissement de la demande énergétique serait de 12% entre 2019 et 2030³. En 2016, la consommation d'énergie primaire à l'échelle mondiale était constituée par 32% de pétrole, 22% de gaz et 27% de charbon, trois formes d'énergie fossile émettrice de CO₂, qui représentent actuellement 80% des sources d'énergie primaire.

² Idéalement de nouvelles technologies à zéro émission de CO₂.

³ <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>

Le processus de transition énergétique doit transformer significativement cette situation. Concernant les enjeux spécifiques à la France, on pourra se référer à la Stratégie Nationale Bas Carbone (<https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>). L'efficacité de solutions technologiques permettant les transitions énergétique et industrielle sera ainsi jugée sur leur capacité à engager des réductions draconiennes de l'utilisation des énergies fossiles (en France, essentiellement des hydrocarbures) et des ressources naturelles, et une transformation radicale des systèmes de production, de transformation et de consommation d'énergie et des matériaux avec l'avènement de technologies nouvelles en développement voire inconnues.

Les défis que doivent relever ces nouvelles technologies à concevoir et à développer, sont donc de taille et ne peuvent s'imaginer que sur un temps long.

Il s'agit de proposer de nouvelles alternatives :

- dans le domaine des **sources d'énergie bas carbone** (nucléaire, photovoltaïque, éolienne, hydraulique, marémotrice, rejets, géothermie...),
- pour la **production de combustibles et de sources de carbone-matière de substitution aux ressources fossiles** (biomasse, hydrogène, utilisation des déchets),
- pour des **procédés de transformation de la matière**, plus performants énergétiquement, à faible impact environnemental et pour la santé, adaptés à l'usage d'énergies renouvelables et favorisant l'économie d'atome, le recyclage et la réincorporation de matériaux recyclés afin de tendre vers une économie circulaire,
- dans les modes de **stockage de l'énergie**, qui concernent aussi bien la chaleur que l'électricité (biocombustibles, nouveaux matériaux, accumulateurs, électrolyseur, piles à combustibles, super-condensateurs, matériaux cimentaires pour le stockage de l'énergie...),
- dans les **modes de diffusion et de consommation optimisée de l'énergie** (optimisation des moteurs et systèmes mécaniques et thermiques, isolation des bâtiments, réseaux optimisés,...).
- dans les **modes de captage et de récupération** d'énergie et de matières (captage CO₂, recyclage des déchets, énergies grises, réutilisation des eaux traitées, ...),
- dans la **conception des chaînes de valeurs** à partir de technologies innovantes dans la production d'énergies et des biens avec une **dimension territoriale et d'optimisation** des flux de matières et d'énergies.

b. Efficacité économique

Les transitions énergétique et industrielle se doivent d'être efficaces sur le plan économique, c'est-à-dire assurer la production et la répartition (équitable) de richesses ainsi que la création d'emplois venant en remplacement de ceux qui seront inmanquablement détruits par le déclin des filières antérieures. Une des questions posées est, par exemple, celle de la régulation des prix en amont des investissements, comme c'est le cas pour l'implantation d'EPR en Grande-Bretagne (prix garantis sur 35 ans).

L'efficacité économique d'alternatives permettant une transition énergétique bas carbone sera jugée à l'aune de leur capacité à satisfaire les besoins exprimés localement par les populations ainsi qu'à leur capacité à créer des emplois. Pour cela, il faut que ces nouvelles technologies assurent un niveau de production (et de consommation) qui va augmenter à l'échelle mondiale. Par ailleurs, un frein courant aux évolutions technologiques permettant de limiter les impacts environnementaux de certains procédés/produits est celui de la réglementation/normalisation.

Certaines solutions existent mais ne peuvent pas forcément être mises en œuvre du fait de normes trop restrictives et/ou inadaptées et/ou insuffisamment évolutives. Le secteur du BTP, particulièrement réglementé et normalisé - pour des raisons de sécurité des biens et des personnes - en est un exemple éloquent. Beaucoup d'efforts ont par exemple été portés en recherche sur le recyclage des bétons de déconstruction sous forme de granulats ou de déchets des cimenteries dans les bétons frais, mais ces solutions ne pouvaient pas être mises en œuvre du fait d'un cadre réglementaire inadapté/incomplet/trop contraignant. Le cadre réglementaire et plus globalement les politiques publiques devraient donc être plus souples, plus réactives et plus évolutives afin d'accompagner au mieux les innovations.

Il s'agit donc d'étudier de nouvelles solutions concernant :

- les **enjeux sociaux, économiques, territoriaux** des solutions alternatives ;
- les **formes d'organisations** possibles - notamment réglementaires - assurant un déploiement économique viable des alternatives considérées, en particulier via une évolution plus agile de la réglementation ;
- les **instruments de politiques publiques** pour accompagner la transition (taxes, subventions, marchés des permis d'émissions...);
- le **design (des échelles) des marchés de l'électricité** (marché de gros, mécanismes de capacités, tarification de la fourniture aux consommateurs, tarification du transport de l'électricité...);
- le **commerce international** de l'électricité (les mix électriques non équivalents, fuites de carbone, mécanismes d'ajustement carbone à la frontière ...);
- l'analyse des **conditions sociotechniques et économiques** de développement et d'implantation des différentes filières énergétiques et de matériaux (production, acheminement, conservation, utilisation);
- l'étude des **complémentarités et des choix stratégiques** de ces alternatives.

Il est nécessaire de mener des recherches sur les différentes formes possibles, en particulier réglementaires, d'un soutien au déploiement des (nouvelles) technologies des transitions.

c. Cognitions, attitudes, représentations sociales à propos de la transition énergétique et des technologies destinées à y parvenir

La question de la transition énergétique et des technologies qui vont permettre de diminuer significativement les émissions de carbone ne peut être décorrélée des attitudes, opinions, connaissances et croyances des populations. Il existe une grande hétérogénéité au sein des populations concernant les connaissances et croyances à propos du changement climatique, de son mécanisme, et des différentes options envisageables pour assurer une transition énergétique. Des analyses de corpus, comme celui issu du Grand débat sur la transition énergétique, ou son corollaire alternatif le "Vrai débat", ou encore des plateformes de débat tels que Reddit, de même que l'analyse de la presse constituent des sources inépuisables de connaissances scientifiques sur la manière dont les gens s'approprient ou contestent l'existence même du changement climatique et la nécessité d'une transition énergétique. Dans une autre approche, on s'intéressera aux attitudes que possèdent les individus à l'égard de l'environnement, aux biais cognitifs, aux opinions politiques, aux valeurs morales, à l'adhésion aux théories du complot en tant qu'elles affecteront la tendance à changer ses comportements en faveur de la transition énergétique.

La question des technologies alternatives dites vertes constitue une intéressante situation de conflit psychologique entre une attitude globalement favorable à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la résistance au changement qu'on a souvent résumée dans la littérature par l'effet Nimby (acronyme de "Not in my backyard" i.e. "Pas dans mon jardin").

Enfin, chaque technologie particulière visant à représenter une alternative au pétrole, au gaz et au charbon constitue un objet de recherche en sciences humaines et sociales visant à cartographier les représentations sociales et comprendre les mécanismes perceptifs et cognitifs sous-tendant le choix et l'usage d'une technologie alternative.

II Enjeu Équité Sociale

Une des questions spécifiques aux transitions et à leurs diverses modalités est celle de *l'équité* entre les groupes de populations, les générations et les territoires. Les débats philosophiques ou sociologiques sur les notions d'équité, et corrélativement de justice, étant ouverts, le problème soulevé continue d'être abordé sans que soit disponible une définition stable ou largement partagée de ce qui est équitable ou juste.

Au-delà des débats généraux concernant les concepts d'équité et de justice, l'expérience acquise et les travaux menés sur la mise en œuvre de la transition énergétique dans les territoires mettent en évidence plusieurs effets, dont : le renforcement des inégalités d'accès à l'énergie, l'inefficacité relative de certains dispositifs quand ils conduisent à un effort économique accru pour les ménages, les complications techniques parfois difficiles à surmonter pour certains groupes de population.

Ainsi, les technologies recherchées doivent atteindre des degrés de sophistication technique variables dans la mesure où leur adoption va dépendre des moyens disponibles sur un territoire en termes : de ressources énergétiques et matérielles, de coût, d'aptitude à les faire fonctionner, de capacité à les entretenir, de réseaux formés par les équipements de captation, de conditions de transports adéquates, de moyens de stockage pertinents, d'encadrement réglementaire...

Ces résultats conduisent à considérer que les nouvelles technologies doivent être diverses pour s'adapter aux contextes spatiaux. Autrement dit, l'équité signifie qu'il n'y a pas de technologie de l'énergie et de production de biens (notamment l'accès aux biens de première nécessité comme l'eau et la nourriture), universellement applicable, c'est-à-dire qui puisse être considérée indépendamment de ses conditions d'implantation dans des territoires.

Le caractère socialement équitable des nouvelles technologies n'implique donc pas leur uniformité ; il suppose leur diversité pour produire des résultats équivalents.

La complexité du problème est réelle parce qu'est ainsi privilégiée une approche ouvrant des voies multiples pour la recherche, fondées sur la conception d'une technologie formulant simultanément le potentiel d'efficacité et d'équité.

Ces recherches nécessitent des coopérations inter-sciences qui permettront de formuler les problèmes posés et, autant que possible, leur résolution **tout au long du cycle de l'énergie et de la matière** (de leur conception à leur fin de vie en passant par leur usage et leur recyclage).

L'enjeu théorique est de déterminer les conditions *normatives* susceptibles d'assurer des chances d'accès égales, pour les populations, aux nouveaux modes énergétiques et aux produits issus de l'économie circulaire.

III. Enjeu protection environnement/santé

Les risques technologiques, qu'ils soient chroniques ou accidentels, sont devenus un thème public confirmé (un sujet de controverses) qui questionne la raison d'être de certaines activités susceptibles d'engendrer des phénomènes dangereux (toxicité/écotoxicité, explosion, incendie...). La **légitimité des décisions de politique énergétique et industrielle est ainsi mise en débat** quant à leur capacité à dépasser le seul critère d'efficacité pour le combiner avec ceux de protection (et d'équité).

Le défi à relever est de réduire les risques connus, sans pour autant générer de nouveaux risques faute de les avoir envisagés et pris concrètement en considération en amont, *dès la conception des technologies*. Les transitions énergétique et industrielles répondent, pour partie, à cet enjeu au moins du point de vue des pollutions les plus impactantes en termes de changement climatique (émission de CO₂), de qualité environnementale (air, eau) et de santé des populations (alimentation, exposition aux produits chimiques, aux ondes et au bruit), ces trois aspects étant corrélés.

Les approches *d'écoconception* et de *safe by design*⁴ constituent ainsi des voies de recherche pertinentes pour le développement des nouvelles technologies même si elles ne suffiront pas, par elles-mêmes, à éteindre les controverses quand un mode de production industriel est radicalement contesté, (comme c'est actuellement le cas pour le nucléaire⁵). Une telle approche concerne aussi bien le respect de l'obligation (légale) de prévention que l'impératif de précaution (qui va au-delà du principe politique de précaution).

L'enjeu des recherches est alors d'intégrer les exigences de *safe by design* et *d'écoconception* sans attendre que les technologies conduisent à des conséquences difficilement réversibles, voire irréversibles.

Cette démarche doit s'appliquer doublement : (a) aux processus énergétiques et industriels et (b) aux matériaux utilisés.

a) Le premier volet vise la sûreté (ou la sécurité⁶) des installations dans lesquelles doivent être incorporées les nouvelles technologies. Il y a en effet, une différence entre ces nouvelles technologies et les installations proprement dites, en raison notamment **des modes d'organisation** de l'activité impliquée. Le principe du *safe by design* est une voie qui permet d'anticiper les défaillances éventuelles des installations **et celles liées à leur gestion**. L'approche *d'écoconception* permet de réduire les impacts environnementaux **dès la phase de conception** des procédés et des produits, et d'inclure des critères économiques et sociétaux à leur optimisation.

Ces démarches sont déjà intégrées dans certaines activités industrielles (notamment dans la filière chimie où la « réduction des impacts environnementaux et des risques à la source » est devenue un principe cardinal). Les recherches doivent tirer parti de ce qui est acquis mais elles pourraient aller au-delà de l'anticipation des défaillances en visant un objectif plus ambitieux : la conciliation de l'efficacité et de la sécurité.

⁴ On parle aussi de *Prévention by design*

⁵ L'amélioration de la prévention pour les nouveaux réacteurs ne met pas fin aux controverses qui portent non pas sur la sûreté, mais sur le potentiel de catastrophe, les déchets et, aussi, le secret-défense réglementant le nucléaire.

⁶ Dans le nucléaire, on parle de sûreté, dans la chimie de sécurité, pour gérer le risque de catastrophe.

Ces deux termes ne sont que très rarement corrélés puisque la définition de la sécurité est rapportée à « *tout ce que l'on peut retirer d'une installation sans en altérer le fonctionnement* ».

Se pose alors une question qui ouvre un large champ de recherche : peut-on – et comment – faire de la *sécurité* un facteur d'efficacité parmi d'autres ?

Ce dernier aspect est transposable au second volet, celui des matériaux, notamment quand il s'agit d'adopter de nouveaux matériaux, qui ne peuvent relever de la prévention puisque les risques santé-environnement sont très spécifiques et encore très difficilement évaluables.

b) Les controverses, désormais anciennes, sur l'usage de matériaux dangereux (cadmium ou amiante, ou des produits issus du recyclage des déchets, par exemple) pour l'environnement et la santé ont mis en évidence la très grande sensibilité de l'opinion publique aux risques chroniques. Ces controverses, qui se déplacent continuellement, ont progressivement débouché sur une réglementation européenne (dont *Reach*) conduisant à des interdictions (amiante, produits issus de déchets) ou à des contraintes d'usage (métaux lourds). Ces controverses ont pesé, par exemple, sur le développement des nanotechnologies avant même qu'elles ne soient significativement industrialisées (pour la filière *bottom-up*).

Cette *expérience sociétale des risques* incite à privilégier des approches *safe by design* et *d'écoconception*, non plus seulement des installations, mais également des matériaux incorporés dans les dispositifs de captation, de conversion, de transport ou de stockage de l'énergie. Les risques pour l'environnement et la santé apparaissent incertains **tout au long de leur cycle de vie**, ce qui demande l'élargissement des frontières des études (en termes d'objets étudiés et d'interdisciplinarités). En outre, en fonction des propriétés spécifiques de ces matériaux, **des risques spécifiques** sont engendrés, toujours mal évalués à ce stade malgré de nombreuses expertises.

L'adoption d'une démarche de précaution ne vise pas à écarter *a priori* les matériaux et procédés intéressants et dont les risques sont incertains. Elle consiste à intégrer le paramètre « risques » en amont *d'écoconception* pour faire émerger des solutions adaptées à la protection.

La précaution, dont le *safe by design* et l'écoconception son complémentaires, doit donc être un ressort, et non pas un frein, pour la recherche de nouveaux matériaux et leurs utilisations.

Les orientations et les enjeux déclinés dans les volets II et III ouvrent un large champ de recherche

Concrètement, les recherches pourront appréhender les processus psychologiques et sociaux qui marquent et/ou accompagnent la question des usages de technologies alternatives, celle de l'équité, ou encore celle de la protection de la santé et de l'environnement au plan **civique, politique et économique** par l'analyse :

- de la portée et du respect d'un principe de justice environnementale ;
- du rôle et de la place des territoires (tension entre collectivités territoriales et État, usages, spécificités locales...);

- de l'action étatique (réglementation, politiques publiques, concertation publique...);
- des modes de production industrielle (acheminement, conservation, utilisation des ressources...);
- de la gestion des risques santé-environnement par les industries (conditions de prise en compte du facteur "risque" dans l'organisation du travail, des produits, des formes de production...);
- des mouvements de contestation (modes d'organisation, évolution des revendications, valorisation de nouveaux modes de vie, processus de légitimation des activités industrielles...);
- des déterminants du changement des pratiques et des usages.

Conclusion

Les différents aspects détaillés précédemment ne peuvent être envisagés et examinés séparément. En effet, une technologie considérée du seul point de vue de son efficacité peut s'avérer ne pas respecter le critère d'équité (compte tenu de l'existence de conditions territoriales hétérogènes d'implantation) ou le critère de protection (compte tenu de l'absence de prise en compte des risques en amont, souvent liée à la difficulté à les évaluer, en particulier quand il s'agit de nouvelles technologies).

Seul un programme de recherche ambitieux et audacieux, fondé sur des coopérations étroites entre les différentes disciplines, est capable d'assurer les croisements nécessaires et d'enregistrer des avancées qui seront mises à la disposition des multiples parties prenantes (l'État, les entreprises, les associations, les syndicats de travailleurs, les experts professionnels et instances normatives) chargées d'organiser la transition énergétique et de proposer de nouvelles approches dans les modes de production et d'utilisation de (nouveaux) matériaux. En outre, même si les recherches menées dans le domaine de l'énergie et de la matière doivent avant tout répondre à des critères de validité scientifique, elles peuvent être aussi l'opportunité de rencontrer les parties prenantes impliquées, y compris quand ces recherches se situent à un niveau très bas de maturité technologique. Cet exercice de confrontation correspond, par exemple, à l'idée des rencontres « Sciences et Citoyens » organisées par le CNRS ou à des pratiques de *Constructive Technology Assessment* mises en place dans des pays du Nord de l'Europe pour des projets de développement technologique.

Cette démarche peut rapprocher la recherche des citoyens tout en la stimulant.