

Scénario « Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte »

N. Alazard-Toux (IFPEN), P. Criqui (CNRS), J-G. Devezeaux de Lavergne (CEA), E. Hache (IFPEN), E. Le Net (CEA), D. Lorne (IFPEN), P. Menanteau (CNRS), S. Mima (CNRS), F. Thais (CEA)

L'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie, l'ANCRE, a entrepris en 2016 la construction d'un nouveau scénario énergétique pour la France à l'horizon 2050. L'objectif est de proposer une trajectoire satisfaisant au mieux les différents objectifs inscrits dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) adoptée en juillet 2015 et les orientations inscrites dans la programmation pluriannuelle pour l'énergie (PPE) publiée en septembre 2016. Dans ce travail, la communauté des chercheurs de l'Alliance a souhaité identifier plus précisément les technologies clés pour atteindre les cibles de la loi, le rythme de déploiement souhaitable des différentes solutions et les principaux verrous à lever dans les années à venir.

Comme dans les précédents exercices prospectifs menés par l'Alliance¹, soit en 2013 sur la France (Scénarios pour la transition énergétique), soit en 2015 au niveau mondial (Decarbonization Wedges), l'ensemble des groupes programmatiques de l'ANCRE a contribué à ce travail². Les scientifiques et experts qui constituent ces groupes ont apporté leurs réflexions et leurs connaissances sur les innovations technologiques et les changements comportementaux dans chaque secteur, afin d'identifier ce que pourrait être la contribution à une transformation en profondeur du système énergétique.

Les objectifs de la LTECV et de la PPE

Une trentaine d'objectifs ont été recensés dans la LTECV et la PPE, qui portent sur différentes échéances (2018, 2023, 2025, 2030 et 2050). La trajectoire construite cherche à atteindre ces cibles, et en particulier les objectifs de la loi suivants :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 % en 2030 par rapport à 1990
- Diminuer la consommation d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à 2012
- Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030
- Augmenter la part des énergies renouvelables en 2030 à 32 % de la consommation finale d'énergie et à 40 % de la production d'électricité
- Ramener à 50 % la part du nucléaire dans la production d'électricité à l'horizon 2025.

¹ Scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013. Decarbonization Wedges, rapport 2015 <http://www.allianceenergie.fr/Etudes-et-rapports.aspx>

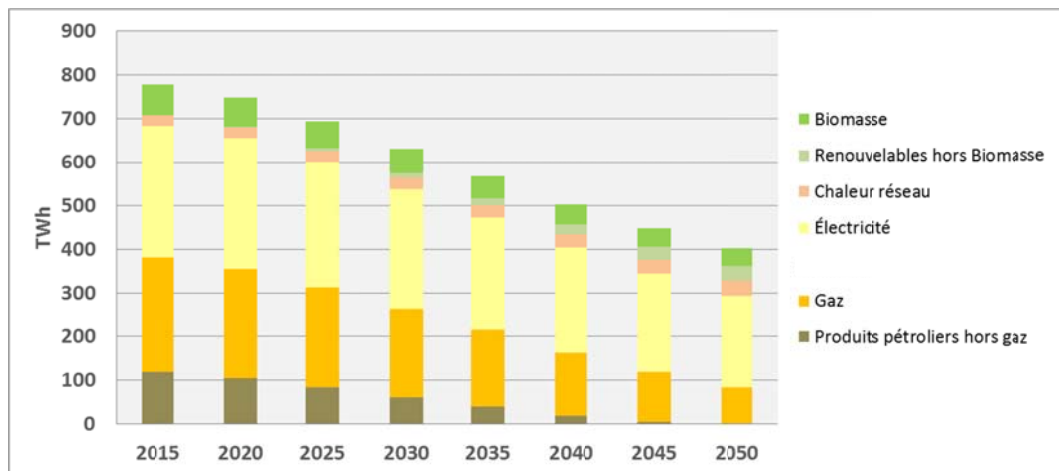
² Pour le détail concernant les groupes programmatiques de l'ANCRE, voir notamment : <http://www.allianceenergie.fr/Groupes-programmatiques-ancre.aspx>

Les grandes évolutions du système énergétique dans le scénario LTECV de l'ANCRE

Le scénario ANCRE-LTECV conduit à une réduction d'un facteur supérieur à 4 des émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990. La réduction des consommations finales est proche de 50 % et celle de la consommation d'énergie primaire de plus d'un tiers entre 2015 et 2050, malgré une hypothèse de hausse de la population et une hypothèse de croissance moyenne annuelle d'environ 1,7 % pour l'économie française. Le scénario construit atteint ainsi la majorité des cibles inscrites dans la LTECV et la PPE. Quelques objectifs ne sont cependant que partiellement atteints aux échéances souhaitées.

Dans le secteur résidentiel-tertiaire, la baisse de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2050 est très proche de 50 %, avec une division par quatre de la consommation d'énergies fossiles (Figure 1). Ces évolutions sont principalement le résultat d'une rénovation énergétique profonde et à un rythme soutenu du parc ancien, d'un déploiement de technologies favorisant efficacité et sources d'énergie décarbonées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, et de la généralisation de solutions permettant de maîtriser la consommation d'électricité. Le scénario suppose une forte montée en compétence des professionnels du secteur qui doivent tout au long de la période pouvoir mettre en œuvre les meilleures technologies. Il implique aussi une industrialisation de la chaîne d'acteurs intervenant dans le domaine du bâtiment afin de réaliser rapidement à des coûts minimum les rénovations énergétiques profondes. Le scénario suppose de plus qu'en parallèle, l'action publique permette de limiter très fortement l'effet-rebond, c'est-à-dire la perte d'une partie des gains d'efficacité du fait d'une augmentation de la demande liée à la baisse de coût des services énergétiques ou à l'apparition de nouveaux usages.

Figure 1 : Evolution de la consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel-tertiaire

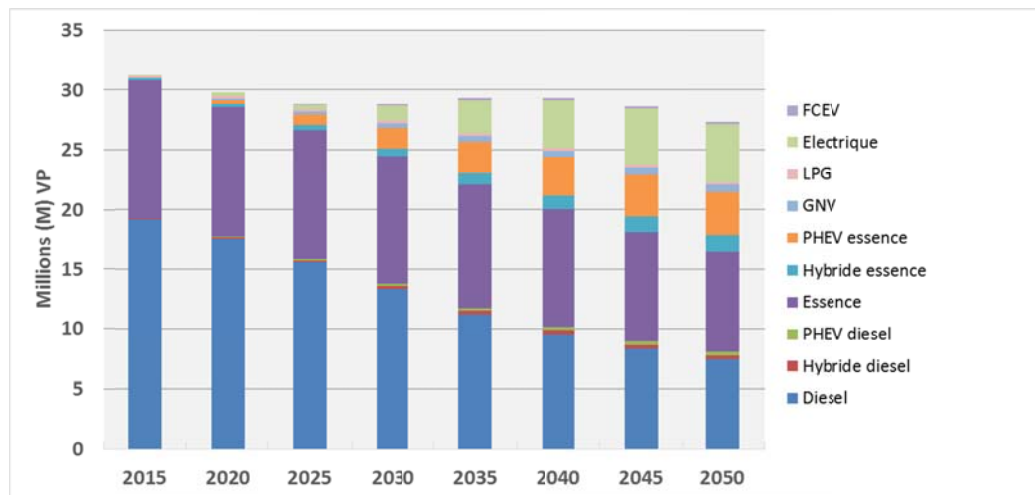


Dans le secteur du transport, la diminution de la consommation d'énergie finale dépasse 50 %. Les sources d'énergie sont beaucoup plus diversifiées qu'aujourd'hui : les parts relatives de la biomasse (biocarburants ou biogaz), de l'électricité et du gaz naturel augmentent aux dépens des carburants pétroliers traditionnels. La consommation de produits pétroliers est divisée par 4 en 2050.

Dans ce scénario, on observe un découplage progressif de la croissance de la mobilité par rapport à celle du PIB. De nombreuses transformations sont impulsées par les changements de répartition modale. Les moyens de transport doux (marche, vélo), collectifs (transports en commun) et les nouvelles formes de mobilité (autopartage, etc.) se développent et sont favorisés par les nombreuses innovations dans le domaine du numérique. Au total, on assiste à un développement massif des modes de déplacement alternatifs à la voiture. En outre, la digitalisation du secteur transport (applications smart phone, voiture autonome, etc.) contribue à une meilleure gestion et à une meilleure régulation du trafic à la fois pour les véhicules particuliers mais également pour l'ensemble des flottes partagées. La digitalisation du secteur impacte également le transport de marchandises avec une meilleure gestion spatiale des activités et une rationalisation des circuits de distribution. En complément, les changements de comportement des consommateurs favorisent le plafonnement des volumes de marchandises transportées en encourageant les circuits courts de distribution.

Le parc total de véhicules légers tend à décroître de 32 à 27 millions de véhicules, avec une orientation électrique et hybride du parc de véhicules (Figure 2). Les véhicules dont l'usage est partagé sont plus utilisés, vieillissent plus vite et sont renouvelés plus rapidement, ce qui contribue à une diffusion accélérée des nouvelles technologies.

Figure 2 : Evolution du parc de véhicules légers par type de technologie.



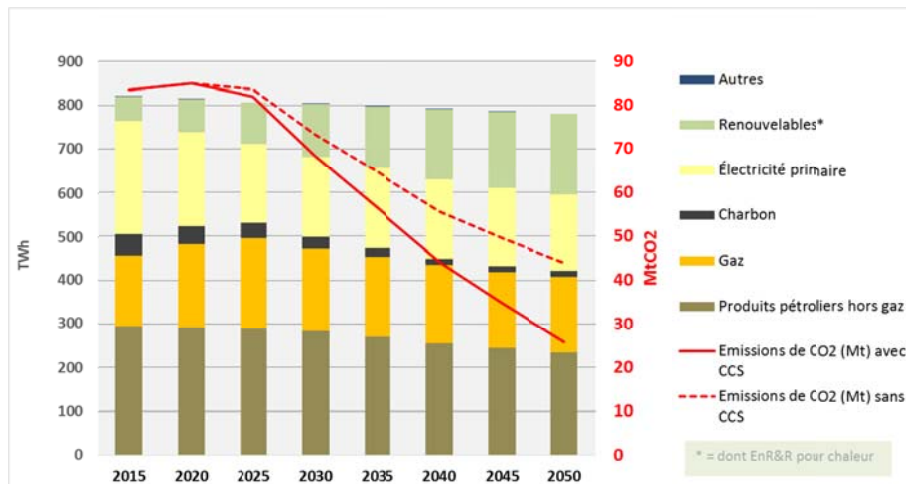
Les consommations unitaires des nouveaux véhicules légers ou camions décroissent fortement. Dans le même temps, les véhicules électrifiés (véhicules hybrides rechargeables ou véhicules électriques, véhicules à hydrogène -FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle-) deviennent plus performants (ratio performance/coût accru pour les batteries, autonomie plus grande, etc.) et leurs parts de marché s'accroissent. En 2050, le parc de véhicules légers est ainsi composé de plus d'un tiers de véhicules électrifiés.

Dans le secteur industriel, la consommation finale baisse légèrement tout au long de la période malgré une augmentation sensible de l'activité, en lien avec la croissance économique et une part de l'industrie dans l'économie nationale supposée constante. Les efforts faits pour améliorer

8 février 2017

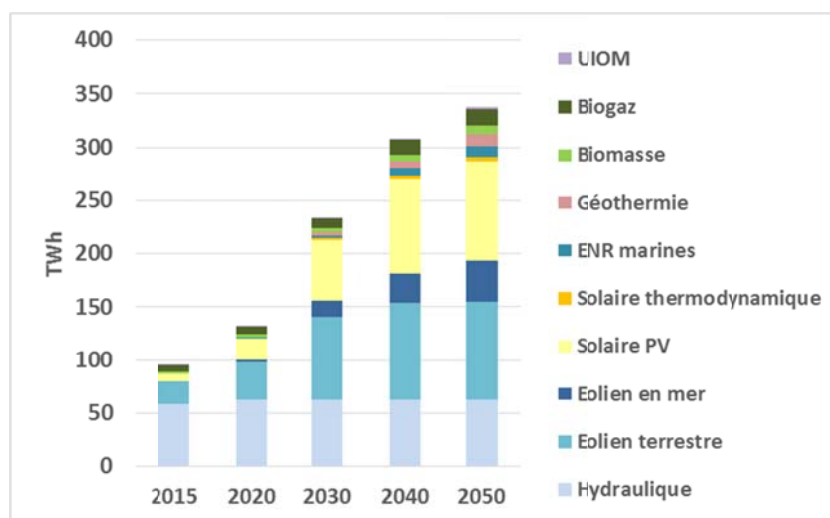
l'efficacité énergétique des procédés industriels permettent de plafonner la demande d'énergie du secteur. Les émissions de CO₂ de la consommation d'énergie de l'industrie connaissent une évolution beaucoup plus radicale et sont divisées par 4 au cours de la période. Ceci est la conséquence, d'une part de la diminution du recours aux combustibles fossiles au profit des énergies décarbonées, et d'autre part de la mise en œuvre dès 2025 du captage-stockage du CO₂ sur de grands sites industriels concentrant d'importants volumes d'émissions.

Figure 3 : Consommation d'énergie et émissions de CO₂ du secteur industrie



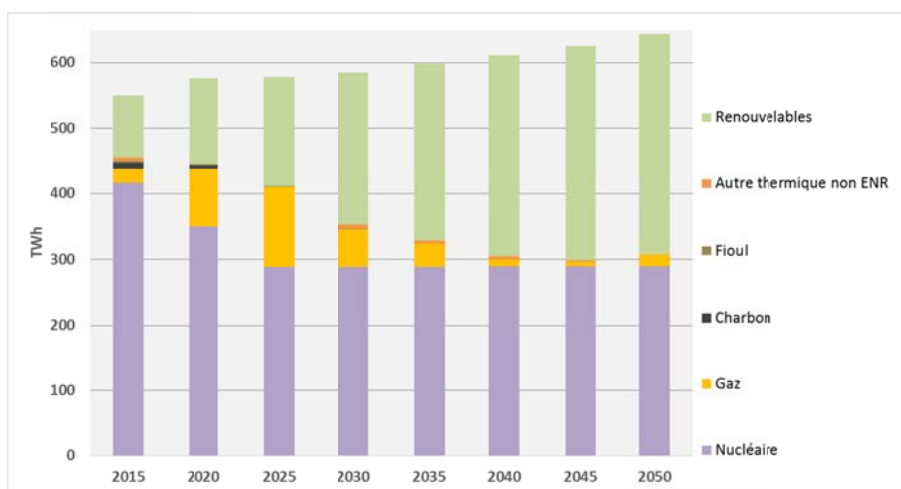
La demande d'électricité s'accroît de 15 % entre 2015 et 2050, essentiellement parce que celle-ci se substitue aux énergies carbonées dans l'ensemble des secteurs, notamment en matière de mobilité. Cet effet reste supérieur, sur l'ensemble de la période, aux gains d'efficacité. La demande est aussi augmentée par la croissance des consommations des centres de données et systèmes informatiques (*data centers et réseaux*), directement liée au déploiement du numérique. La production à partir d'énergies renouvelables est multipliée par plus de 3 (Figure 4), et elle dépasse 50 % de l'électricité produite en 2050 (hydraulique compris).

Figure 4 : évolution de la production d'énergies renouvelables par type d'énergie



La montée en puissance de la part des énergies variables et la baisse de la part du nucléaire nécessitent à l'horizon 2020-2030 d'augmenter les capacités pilotables permettant d'assurer à tout moment l'équilibre offre-demande. Dans un premier temps, des capacités importantes de production thermique de type turbines à gaz doivent être développées pour assurer l'équilibre offre-demande. Il s'en suit une augmentation des émissions de CO₂ par kilowattheure produit. Par la suite, l'accroissement des capacités de stockage et des autres moyens de gestion de charges permet de gérer la variabilité de l'offre et de la demande et de réduire fortement la production à partir de gaz naturel (Figure 5).

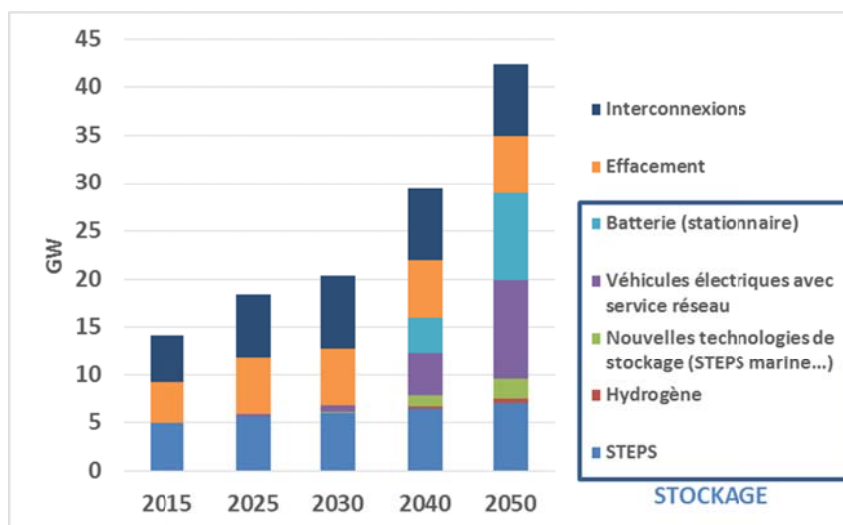
Figure 5 : Evolution de la production d'électricité par type d'énergie



Dans ce secteur, les efforts de recherche doivent permettre la poursuite de la réduction des coûts des énergies renouvelables pour soutenir leur rythme de développement. Ils contribuent également à développer des outils permettant une gestion intelligente des réseaux en articulant niveau local et niveau national et la mise en œuvre de solutions d'effacement ou de stockage. Des progrès sont faits également afin d'accroître la flexibilité du nucléaire (par exemple la réduction du niveau de puissance minimum des tranches) et d'assurer une adaptation plus rapide aux variations d'offre et de demande.

Les innovations dans ce domaine permettent également le développement de solutions de stockage de l'électricité. Dans ce scénario, les capacités de stockage atteignent ainsi près de 30 GW en 2050 contre moins de 5 aujourd'hui (Figure 6). Plusieurs types de solutions doivent être déployés : pour l'essentiel, STEP, batteries stationnaires dédiées, utilisation d'une partie de la flotte de véhicules électriques pour réapprovisionner le réseau sur des périodes de consommation de pointe. Le scénario ainsi construit assure une capacité pilotable du mix électrique (moyens de production pilotables et stockage-effacement) supérieure à la demande de pointe.

Figure 6 : évolution des capacités de stockage et d'effacement



Conclusions

Pour construire le scénario ANCRE LTECV, les experts de l'Alliance ont dû faire des choix sur les variables à actionner (technologies, comportements, rythme de déploiement etc.) dans chaque secteur. Une des difficultés a été de conserver un équilibre entre les différents leviers actionnés. Il s'agissait de ne pas être trop ambitieux sur certaines évolutions et très peu sur d'autres. Le rôle des experts de l'Alliance a été très important dans cette recherche d'équilibre. Un effort a aussi été mené pour s'assurer de la cohérence d'ensemble de la trajectoire construite notamment en termes de bouclage des différents sous-systèmes : électricité, chaleur, biomasse, etc. L'outil OPERA construit par l'Alliance a contribué à faciliter le travail sur ces deux points.

OPERA : Outil de Prospective EnerGétique de l'ANCRE

Le scénario ANCRE LTECV a été réalisé en s'appuyant sur l'outil OPERA.

OPERA est un outil intégré de simulation du système énergétique national. Il est construit de manière à permettre une description assez fine des différents secteurs de demande et d'offre d'énergie. Il permet d'améliorer le bouclage du système énergétique sur diverses dimensions transverses comme l'électricité, la chaleur, la biomasse pour l'énergie ou encore l'hydrogène.

OPERA facilite l'approche itérative entre les experts de l'Alliance pour la construction du scénario, en permettant de questionner les choix faits en termes d'évolution des variables.

Pour finir, l'outil OPERA permet aux organismes de recherche de disposer d'une vision quantifiée des potentiels des technologies qu'ils développent.

Il ressort néanmoins de l'analyse du scénario que les efforts demandés aux divers secteurs restent probablement d'intensités différentes avec par ordre de sollicitation décroissante, le secteur résidentiel-tertiaire, le secteur transport, le secteur industrie et celui de la production d'électricité (si l'on excepte la diminution de la part du nucléaire à l'horizon 2025). Il sera important dans une deuxième phase du travail d'étudier certaines variantes de ce scénario.

Le travail réalisé montre **qu'un potentiel réel de décarbonation du mix énergétique à 2050 existe dès lors que sont mobilisées de nouvelles technologies et qu'évoluent les comportements**. Le développement accéléré des technologies, leur large et rapide diffusion, les changements organisationnels à différentes échelles (modèles économiques et changements de comportements) sont ainsi déterminants pour réussir la décarbonation de l'économie française. Pour construire le scénario LTECV, l'Alliance a actionné tous ces leviers.

Pour se positionner sur la trajectoire décrite par ce scénario, des ruptures fortes sur les technologies, leurs performances (coûts/efficacité) sont indispensables. Un accompagnement par des politiques publiques volontaristes, favorisant l'investissement dans la mise au point et le développement des nouvelles technologies et leur diffusion, incitant aux changements de comportements, sera essentiel. Il s'agira aussi de persévérer, en mobilisant et en amplifiant les efforts dans les secteurs où la France est leader, et ils sont nombreux dans l'énergie, pour créer des emplois et consolider et amplifier notre position dans ce domaine stratégique. **L'analyse de scénarios révèle la grande importance de la dynamique des parcs** (bâtiments, véhicules, installations de production d'électricité). A chaque période, ceux-ci intègrent des technologies de tous âges, dont les conditions et mécanismes de renouvellement sont un enjeu majeur. L'inertie des parcs d'équipements et de leur dynamique de renouvellement peut être un réel frein à l'atteinte de certains objectifs notamment à court terme (au regard de la PPE).

Ce travail mené sur la base d'un scénario unique a confirmé l'essentiel des domaines « invariants » identifiés lors des exercices de l'ANCRE de 2013 et mobilisés pour décarboner l'économie.

Le rôle essentiel des technologies de rupture ou *game changers* identifiés dans les études précédentes de l'Alliance a été confirmé. Les besoins correspondants d'innovations radicales sont surtout sensibles dans les secteurs et technologies suivants : industrie (nombreuses technologies en jeu, dont ruptures pour les industries grosses consommatrices), réseaux, stockage massif d'électricité, et technologies de captage et stockage ou du recyclage du CO₂.

Les conséquences en matière de R&D sont de plusieurs ordres et trouvent leur justification dans la recherche des trajectoires respectant la transition. Cette démarche par scénarios est un moyen de préciser les thématiques et dynamiques transformatrices clés pour la transition énergétique. Ressortent alors les priorités suivantes:

1. Accélérer l'effort global de la France et de l'Europe dans les technologies « bas carbone » à la suite de la COP21 (dont Mission Innovation).
2. Ne pas relâcher l'effort sur les technologies existantes (comme le moteur thermique), les progrès des années à venir étant d'abord fondés sur la diffusion des meilleures technologies existantes.
3. Mieux organiser la recherche dans des sujets transverses parfois difficiles à appréhender, comme la gestion de la chaleur et les conversions entre vecteurs énergétiques.
4. Valider les nouveaux concepts via des démonstrateurs dans les territoires.
5. Orienter une partie significative de la recherche vers des projets à TRL moyen (4 à 7) et développer les technologies génériques.

8 février 2017

Les propositions par l'Alliance pour la Stratégie Nationale de Recherche ont bénéficié de cette approche par scénario (en 2014 et 2016).

Par ailleurs, le Groupe Programmatique 9 (GP9 : prospective, économie) de l'Alliance rappelle l'importance de croiser les recherches technologiques et les sciences humaines et sociales (au-delà même de l'économie), au sein de programmes interdisciplinaires et ce, dès le début du processus d'innovation. L'innovation n'est pas que technique et doit aussi être sociale, juridique, organisationnelle. Un exemple en est la nécessité de réformer en profondeur les marchés de l'électricité pour permettre un fonctionnement adapté de ce secteur (avec des enjeux majeurs en termes de compétitivité, précarité, organisation du territoire et des villes...). Le GP9 identifie aussi la réflexion sur la mutation des modèles soutenant l'analyse prospective, pour aller vers une plus forte capacité à être explicités et questionnés par les parties prenantes et les décideurs publics.

Poursuite du travail dans les mois à venir

Différentes variantes à ce scénario seront étudiées dans les mois à venir. Ces variantes concernent la production de chaleur, la gestion de la variabilité, les vecteurs énergétiques dans les transports ou encore le niveau d'industrialisation de l'économie. Des indicateurs seront construits afin de décrire le volontarisme du scénario et de chacune des variantes. Il est aussi prévu de quantifier les chroniques d'investissement du scénario central et de ses variantes et d'évaluer les coûts des énergies finales et leurs évolutions. Enfin, la construction des éléments d'un bilan environnemental de ce scénario est également programmée, ainsi que des bilans ciblés sur certaines ressources, matières premières mobilisées.