

***Contribution pour la Stratégie Nationale de Recherche
en réponse au défi de société :
« Une énergie propre, sûre et efficace »***

A travers les propositions figurant dans ce document, l'ANCRE contribue également aux défis « Mobilité et systèmes urbains durables », « Stimuler le renouveau industriel », « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique », « Sécurité alimentaire, défi démographique et bio-économie » et « Société de l'information et de la communication ».

L'ANCRE s'est appuyée pour cette contribution sur les travaux conduits récemment sous l'égide conjointe de la Direction Générale de l'Energie et du Climat (MEDDE) et de la Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation (MESR), auxquels l'ANCRE a été associée aux côtés de l'ADEME et du CGDD, en vue de la préparation de la Stratégie Nationale de Recherche dans l'Energie prévue par l'article 10 de la loi du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique. Cette démarche a été adoptée afin de favoriser la cohérence entre les exercices menés.

Juillet 2013

Résumé exécutif

Dans les décennies qui viennent, la demande d'énergie mondiale va continuer à augmenter à un rythme soutenu sous l'effet de la pression démographique et de la croissance économique des puissances émergentes. Dans un contexte probable de prix de l'énergie durablement élevé, cette évolution pose un quadruple défi, de sécurité énergétique, de préservation de l'environnement, de limitation du risque climatique et de gestion économe de matières premières.

Si face à ces défis, certaines nations sont mieux dotées que d'autres, notamment parce qu'elles possèdent des ressources énergétiques importantes disponibles sur leurs territoires, la plupart d'entre elles ont entamées des réflexions visant à faire évoluer leur mix énergétique en intégrant en haute priorité la dimension de compétitivité économique.

La France est elle-même engagée dans une réflexion sur les conditions optimales d'une transition énergétique dont les contours ne sont pas encore entièrement définis. Pour autant, certaines lignes se dessinent, notamment :

- la nécessité de renforcer les efforts en matière d'efficacité et de sobriété énergétiques afin de réduire les importations d'énergies fossiles qui pénalisent sa balance commerciale et, par voie de conséquence, de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre,
- l'accroissement de la place des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique dans le double objectif de diversification du mix et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le passage à un nouveau modèle énergétique ne devra pas se traduire par une augmentation trop importante des prix de l'énergie et des dépenses qui serait préjudiciable à la situation économique française. A l'inverse, il devra favoriser le développement ou le renforcement des filières nationales de l'énergie, y compris à l'exportation. En effet, la problématique énergétique est mondiale, même si elle présente une expression variable selon les différentes zones géographiques ; la France dispose d'énergéticiens champions mondiaux parfaitement armés pour conquérir dans la durée, les marchés correspondant en jouant de plus un rôle de chef de file à l'exportation pour l'ensemble de l'industrie énergétique nationale.

Pour l'ANCRE, la stratégie nationale de recherche dans le domaine de l'énergie - SNR(E) - doit intégrer ces différents enjeux en considérant les différentes échelles temporelles, à court, moyen et long terme et en tenant compte des atouts du système énergétique et de ses vulnérabilités. Ainsi, cette stratégie doit-elle contribuer d'une part, appuyée par des politiques adaptées et s'inscrivant dans la durée, au déploiement de filières industrielles nationales. D'autre part, elle doit accompagner la transition énergétique en relevant les défis technologiques majeurs tout en aidant à surmonter les obstacles de natures sociétale et économique.

De plus, les efforts de recherche indispensables pour améliorer les technologies existantes doivent être mis en œuvre en parallèle d'un soutien pérenne à une recherche fondamentale d'excellence et pluridisciplinaire, nécessaire à l'émergence de concepts en rupture. Enfin, la stratégie nationale doit répondre aux grands défis sociétaux de ce XXIème siècle et être pleinement articulée avec le programme européen H2020.

Les préconisations de l'ANCRE en matière de stratégie nationale de recherche dans le domaine de l'énergie résultent de ce diagnostic. Elles s'articulent autour de l'identification de principes et propositions d'actions ainsi que de priorités thématiques visant à renforcer l'efficacité des efforts de R&D dans l'énergie au regard des enjeux de politique énergétique et de développement industriel.

Principes d'actions

Au regard des objectifs rappelés ci-avant et des forces et faiblesses de la recherche nationale dans le domaine de l'énergie, l'ANCRE propose d'adopter les principes d'action suivants comme autant de conditions nécessaires :

- **Focaliser les moyens sur les priorités** définies et mettre en place des **mécanismes de suivi** des feuilles de route choisies et de capitalisation des acquis, en s'appuyant sur des indicateurs objectifs,
- **Développer la transversalité** entre filières (déchet et énergie, par exemple via les biotechnologies, offshore pétrolier/ EMR) ou entre réseaux énergétiques - électricité+ gaz+chaleur- ou encore couplages construction /ENR, transport/ENR/efficacité TIC- efficacité énergétique, etc... en tenant compte des besoins et attentes des usagers et autres parties prenantes,
- Développer davantage les **approches systèmes** y compris en intégrant les concepts de villes et mobilité intelligentes, écosystèmes industriels...) **en complément du développement des « briques technologiques »** innovantes ; il y a souvent plus à gagner en optimisant les systèmes que les composants unitaires,
- **Anticiper les besoins des marchés** énergétiques de demain, en France, en Europe et dans le monde, notamment pour les marchés dynamiques des pays émergents, dont les besoins sont spécifiques,
- Anticiper un **rôle accru de la modélisation, multi-échelle et pluridisciplinaire, des TIC** et de « l'intelligence » dans tous les développements liés à l'énergie (en interaction avec Allistène et ATHENA).

Constats et actions proposées

En lien avec les principes d'action et priorités thématiques, l'Alliance propose à partir de 5 constats, 16 actions visant à accroître l'efficacité des efforts de R&D :

Constat 1: Nécessité d'inscrire, dans la durée, la dynamique de structuration des acteurs de la recherche publique

Il s'agit dans la continuité de la création de l'ANCRE, des pôles de compétitivité et des comités stratégiques de filières, d'assurer l'efficacité, la cohérence et la complémentarité des efforts engagés par les organismes publics de recherche autour de priorités nationales clairement définies dans la durée [Action 0] , mobilisant des outils complémentaires et articulés entre les échelles territoriales, nationales et européennes [Action 1].

Concertation avec les différents acteurs publics et privés, cohérence accrue des actions de R&D publique en matière d'énergie, retour d'expérience systématisé et évaluation des grands programmes soutenus par l'État, sur la base de critères adaptés en fonction du degré de maturité des technologies, doivent être améliorés : dans ce cadre, le rôle de l'ANCRE en tant qu'instance de coordination et interlocuteur pour les pouvoirs publics est appelé à se renforcer [Action 2].

Constat 2: Nécessité de renforcer la place de la prospective énergétique

Si des outils existent à travers les réseaux de prospective ou dans les organismes de recherche, leur exploitation reste trop marginale. La communauté scientifique se prive ainsi d'outils de médiation susceptibles de faciliter les coopérations et d'enrichir la réflexion stratégique, mais aussi de faciliter la mise en place de collaborations internationales [Action 3].

Par ailleurs, la capacité de construire une vision prospective intégrant les évolutions de politique internationale, les dimensions sociologique, technologique et économique du système énergétique mondial et de ses composantes est indispensable, qu'il s'agisse d'apporter une aide à la décision pour les politiques énergétiques, économiques ou d'orienter la recherche, notamment technologique [Action 4].

Constat 3: Nécessité d'améliorer le rayonnement de la R&D nationale

Au niveau européen, la participation française aux projets de l'EERA, aux plates-formes technologiques et aux programmes du PCRD pour la recherche fondamentale, par une meilleure information et une plus grande incitation des chercheurs [Actions 5 et 6].

Une stratégie de partenariat international dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie devrait être élaborée, dans le but de favoriser les synergies –au sein de l'Union européenne et dans un cadre plus large-, de mobiliser les meilleures compétences au niveau mondial, d'attirer les talents étrangers - y compris par le biais d'action spécifiques sur les campus - et, le cas échéant, d'apporter un appui à nos industriels pour l'exportation [Actions 7 et 8].

Constat 4: Nécessité d'amplifier l'impact de la R&D sur la compétitivité des filières industrielles françaises

La R&D doit permettre de favoriser le développement d'un tissu d'industries innovantes notamment en encourageant la création de start-ups et le développement des entreprises de taille intermédiaire (ETI). Si d'ores et déjà, les organismes de recherche ont des relations étroites avec l'industrie, que les pôles de compétitivité et, plus récemment, les Instituts Carnot ont favorisé ces rapprochements, des axes d'améliorations persistent : amplification de la structuration en filières intégrant systématiquement un groupe recherche (avec participation de l'ANCRE), définition de feuilles de route technologiques par filière permettant d'assurer une convergence entre les efforts de R&D publics et les stratégies industrielles, organisation systématique des filières au plan national en miroir de la structuration européenne, afin de mieux utiliser le levier communautaire [Action 10].

Dans les thématiques prioritaires, la création de réseaux devrait être encouragée afin de mobiliser des masses critiques et coordonnées de chercheurs [Action 9]. En matière de démonstrateurs, des efforts de rationalisation devraient être faits afin d'éviter une dispersion des moyens obérant la capacité à développer des projets ambitieux [Action 11]. Le passage de la R&D à l'industrie doit être facilité par le déploiement de lignes pilotes préindustrielles, intégrées à des centres de recherche technologique [Action 12], au profit notamment des start-ups [Action 13].

Constat 5 : Nécessité d'adapter l'offre de formation aux besoins du secteur énergétique

La transition énergétique devrait se traduire par la destruction et la création de centaines de milliers d'emplois de niveaux de qualification variés. Il convient de mieux prévoir l'évolution des besoins en ressources humaines, de créer ou adapter les cursus existants afin de répondre à l'offre d'un marché de l'emploi en évolution, tant dans le domaine des formations diplômantes que dans celui de la formation continue afin de permettre les reconversions nécessaires (Actions 14 et 15).

Liste des actions proposées :

- **Action 0** : fixer pour une période de 5 ans au minimum, et de préférence 8 à 10 ans, la segmentation thématique de référence, et positionner dans ce cadre systématiquement les actions soutenues par l'État. Focaliser les moyens sur les priorités thématiques stratégiques,
- **Action 1** : poursuivre la structuration en visant systématiquement à mobiliser une masse critique de chercheurs, au niveau national, européen voire international selon la nature plus ou moins stratégique des technologies, sans ajouter de strate nouvelle, en visant une cohérence d'action et la mobilisation d'outils complémentaires articulés : réseaux, projets majoritairement bottom-up, projets intégrés (ou défis, majoritairement top-down) et programmes, démonstrateurs,
- **Action 2** : en interaction étroite avec la DGRI et la DGEC, tirer parti et faire évoluer l'organisation récemment adaptée de l'ANCRE pour s'appuyer sur cette dernière dans un rôle de garant de la cohérence des actions de R&D publique en matière d'énergie, dans le respect des rôles et des missions de chacun des acteurs concernés,
- **Action 3** : renforcer l'usage des outils de prospective à la fois comme outils de médiation facilitant les collaborations, la structuration et dans le but de disposer systématiquement sur chaque priorité thématique d'agendas stratégiques, régulièrement remis à jour, regroupant les éléments projetés d'avancée des connaissances et les feuilles de routes technologiques,
- **Action 4** : inscrire dans la durée l'action de construction et d'amélioration des scénarios technico-économiques de transition énergétique. Cette action permet d'éclairer globalement les trajectoires possibles et de structurer sur le long terme la SNR(E),
- **Action 5** : mettre en place une action continue pour que les meilleurs chercheurs se mobilisent en dépassant leur discipline pour considérer l'apport de leurs connaissances au domaine de l'énergie,
- **Action 6** : amplifier l'action au plan européen au travers d'une plus grande cohérence en termes de thèmes scientifiques entre les stratégies nationales et européennes,
- **Action 7** : documenter puis mettre en place une stratégie internationale de collaboration,
- **Action 8** : tirer parti de la logique de site en cours de concrétisation et y intégrer des campus de démonstration de solution innovante en matière énergétique en s'appuyant sur les pôles de compétitivité,
- **Action 9** : mobiliser des masses critiques et coordonnées de chercheurs sur chaque thématique prioritaire,
- **Action 10** : mettre en place une structuration systématique des filières intégrant un groupe de travail recherche, incluant une représentation de l'ANCRE, permettant de coordonner les efforts destinés à lever les verrous technologiques et économiques sur la base de feuilles de route. S'organiser systématiquement au plan national en miroir de la structuration européenne lorsque celle-ci existe (JTI, association sur le stockage de l'énergie, etc.),

- **Action 11** : amplifier et coordonner les actions territoriales sur les démonstrateurs en sollicitant en particulier le retour d'expérience,
- **Action 12** : étendre le déploiement de lignes pilotes à la production de composants du système énergétique en cohérence avec la démarche soutenue par la Commission européenne,
- **Action 13** : favoriser la création massive de start-ups par les jeunes diplômés et les chercheurs et leur accompagnement sur les marchés prometteurs en encourageant la prise de risque –et sa mesure- et en développant les mesures de soutiens financier et institutionnel des start-ups du premier au troisième tour de table,
- **Action 14** : veiller à la cohérence des calendriers en identifiant l'évolution des besoins en compétences nécessaires à 5 ans et ce, pour la totalité du spectre (technicien, ingénieur, chercheur) nécessaires, à renforcer ou à développer compte tenu de l'existant et des reconversions nécessaires,
- **Action 15** : mettre en place (ou développer) les outils et structures de formation diplômante et continue, y compris le développement de la formation par la recherche en favorisant le doctorat, nécessaires et s'assurer de l'attractivité des formations et carrières en tenant compte de la diversité des profils requis.

Priorités thématiques

Les priorités thématiques proposées visent à apporter des réponses aux enjeux des politiques énergétique et climatique (coût de l'énergie, sécurité d'approvisionnement, réduction des émissions de CO₂) économique (balance commerciale) et industrielle (compétitivité, ré-industrialisation) au regard du contexte mondial.

L'articulation en cinq priorités a vocation à mettre en avant les objectifs structurants à poursuivre à travers la stratégie nationale de recherche dans le domaine de l'énergie. Les trois premières permettent notamment de définir des domaines-clés sur lesquels le développement d'une industrie française et/ou le maintien d'un leadership français doit être assuré.

Les choix retenus répondent à une série de critères incluant : l'intérêt stratégique pour la France au regard de la transition énergétique dans une vision globale de son système énergétique, l'impact spécifique des efforts de R&D, la capacité industrielle à développer une offre compétitive –sur le marché national et à l'exportation-, enfin, le potentiel académique français. Elles visent à utiliser dans toute la mesure du possible le levier communautaire. Pour chacune de ces priorités les verrous scientifiques et technologiques ont été déterminés et des mesures d'accompagnement identifiées (réglementaires, économiques...).

Priorité 1 : Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique

- **Optimiser le système énergétique : stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs, réseaux intelligents**

Le déploiement massif d'énergies renouvelables intermittentes nécessitera une optimisation de l'accommodation de l'offre à la demande énergétique (quelle que soit sa nature), tout en garantissant la fiabilité de la fourniture d'une énergie peu carbonée pour un prix de revient acceptable. Le stockage de l'énergie et l'inter-conversion entre vecteurs (hydrogène, gaz hydrocarbonés, électricité, chaleur) et le développement de réseaux énergétiques intelligents sont les enjeux technologiques clef pour la réussite de ce déploiement.

En sus des recherches portant sur les enjeux technologiques –inter-conversion, stockage, électrolyseurs, piles à combustible – doivent être développées les études –techniques, socio-économiques et financières - nécessaires au déploiement des infrastructures et notamment aux aspects sûreté, cyber-sécurité et résilience des réseaux.

- **Réduire la consommation énergétique nationale : efficacité énergétique des usages dans le bâtiment, le secteur des TIC, les transports et l'industrie**

La France s'est engagée à réduire, à l'horizon 2020, de 20% sa consommation d'énergie par rapport à la trajectoire tendancielle de 1990. A ce stade, malgré les progrès déjà réalisés, l'atteinte de cet objectif et a fortiori de cibles plus ambitieuses, suppose encore des investissements significatifs et des changements de comportements majeurs.

La R&D est susceptible de contribuer à surmonter ce défi en permettant le développement de produits, procédés et services compétitifs moins consommateurs d'énergie –en particulier dans les secteurs **du bâtiment, de l'industrie, et des technologies de l'information et de la communication (Green IT)** -, et en apportant des outils de mesure et de modélisation pour la conception de systèmes urbains intégrés plus économes en ressources. Une attention devra être accordée à la valeur économique susceptible d'être apportée au marché grâce à ces efforts de recherches et aux produits et services qui en découleront.

Il est à souligner l'importance de maintenir en France les industries à forte consommation énergétique par l'optimisation énergétique des installations industrielles, la mutualisation énergétique d'un territoire industriel, et le lien de ce territoire avec le système urbain.

Dans les transports, l'enjeu majeur est de réduire la consommation d'hydrocarbures à travers notamment le **développement de véhicules individuels basse consommation** et un passage à la mobilité électrique ou piles à combustibles, dans des conditions économiques acceptables. Au-delà, le traitement de la question de la mobilité doit tenir compte de l'ensemble des modalités de transport (ferroviaire, aérien, maritime) et être abordée de façon systémique (aménagement urbain, développement des infrastructures de transport, comportements des usagers...) en liaison avec l'alliance Allenvi.¹

- **Développer une offre compétitive en matière d'énergies renouvelables afin de favoriser leur insertion dans le mix énergétique sans surcoût excessif.**

Qu'il s'agisse de la biomasse, **du solaire, des énergies marines ou de la géothermie profonde**, de nombreuses ruptures technologiques, qui permettront de réduire les coûts de production de ces sources d'énergie, sont attendues.

A côté de l'amélioration de la compétitivité économique de ces filières qui conditionne leur pérennité au regard de la concurrence internationale, l'un des enjeux est de développer des **outils de modélisation numérique permettant d'évaluer et de prédire** avec précision la ressource.

¹ Ces propositions ont vocation à compléter les travaux de structures dédiées (PREDIT, CORAC, etc.) les domaines correspondant n'ont pas été traités dans ce document.

Priorité 2 : Capitaliser sur les atouts compétitifs des filières actuellement majoritaires dans le bouquet énergétique et veiller à la sécurité d'approvisionnement des ressources stratégiques

Dans les secteurs des hydrocarbures et du nucléaire, la France compte des acteurs industriels d'envergure internationale générant une activité économique importante. Ces filières contribuent fortement à la sécurité énergétique nationale (et au rééquilibrage de la balance commerciale par leurs activités fortement tournées à l'exportation) et, s'agissant du nucléaire, à la fourniture d'une électricité peu carbonée et compétitive. Quelles que soient les trajectoires de transition énergétique retenues, l'atout que constituent ces filières doit être préservé.

- Dans le domaine **des ressources énergétiques** (hydrocarbures de roche compacte, hydrates de gaz, gaz biogénique et hydrogène naturel) et **minérales stratégiques**, l'évaluation des ressources nationales et le développement d'outils, méthodes et technologies permettant d'en proposer une exploitation économiquement performante, dans des conditions respectueuses de l'environnement, doivent faire l'objet de recherches approfondies.
- S'agissant de **l'énergie nucléaire**, les enjeux sont de poursuivre l'amélioration de la sûreté du parc existant et celle du conditionnement des déchets radioactifs tout en préservant la compétitivité de cette filière, mais aussi de poursuivre les études destinées à l'adapter au contexte de la transition énergétique (gestion de l'augmentation d'énergies intermittentes et utilisation de la chaleur fatale). Il s'agit également de préserver l'avance française en préparant la quatrième génération de réacteurs et de préparer le très long terme à travers la recherche dans le domaine de la fusion thermonucléaire.

Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique

- Le **captage, le transport, le stockage et la valorisation du CO₂ (CSCV)** constituent un verrou majeur au regard de l'objectif du facteur 4. L'enjeu est de développer des technologies compétitives pour le captage et le stockage du CO₂, et de lever les freins sociétaux vis-à-vis du stockage. Dans le domaine de la valorisation du CO₂, il s'agit d'aboutir à des technologies compétitives permettant d'exploiter le CO₂ dans l'optimisation des systèmes énergétiques en apportant des options supplémentaires pour le stockage de l'énergie et les inter-conversions entre vecteurs enfin, de le valoriser à travers la production de molécules et matériaux d'intérêt.
- La **gestion de la chaleur** constitue également un enjeu majeur dans la mesure où la moitié de la consommation d'énergie nationale se fait sous cette forme et où il existe des marges de progrès considérables dans l'utilisation de la chaleur résultant des activités industrielles et de production d'énergie.

Priorité 4: Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables aux investissements nécessaires

La transition énergétique amène une nouvelle organisation des pouvoirs et des responsabilités, ainsi que de nouvelles pratiques qu'il convient d'anticiper, de prendre en considération et de concilier avec les enjeux liés à l'énergie pour la nation, tels que l'indépendance énergétique et la

sécurité d'approvisionnement, la répartition des coûts et la pérennité de la solidarité entre territoires. L'évolution du système énergétique appelle également la définition de modèles de marché adaptés ainsi que la mise en place des cadres réglementaires adéquats par les pouvoirs publics. Enfin, il conviendrait de renforcer la capacité d'intégrer de façon dynamique les aspects socio-économiques contingents des choix de politique énergétique. Ces démarches devront éviter l'écueil d'une focalisation exclusive sur les modes de fonctionnement et systèmes de valeurs français (voire occidentaux, ou à tout le moins européens) au regard d'enjeux - notamment industriels- et de problématiques qui transcendent très largement les frontières d'une nation.

Une démarche conjointe avec l'alliance Athéna est à consolider pour améliorer dans la durée les approches holistiques des problématiques énergétiques qu'elles soient de portée nationale, européenne ou internationale.

Priorité 5: Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie

Développer un socle de connaissances fondamentales et génériques au meilleur niveau mondial constitue un enjeu majeur pour renforcer la capacité française à faire émerger des concepts en rupture, susceptibles d'aboutir à des produits et services innovants. A ce titre, un soutien, large, à l'ensemble des domaines ayant potentiellement un impact dans celui de l'énergie est nécessaire. Afin de permettre d'améliorer la dynamique de transformation des recherches fondamentales en ruptures technologiques, les orientations proposées par l'ANCRE visent à mobiliser dans une démarche bottom-up, les acteurs de la recherche fondamentale sur des projets présentant un potentiel de rupture dans le domaine de l'énergie. Il s'agit de la mise en place de réseaux pluridisciplinaires thématiques pérennes, du développement de programmes de recherche (« concepts en rupture pour l'énergie » de l'ANR) et du développement d'études de potentialités économiques des projets de recherche amont.

Le tableau ci-après présente l'ensemble des priorités en proposant, pour chacune d'entre elles un niveau relatif d'importance, établi au regard de l'enjeu qu'elle présente et des moyens actuels affectés ou programmes annoncés. L'identification de thèmes ou domaines d'intérêts a vocation à permettre de décliner à ce niveau les feuilles de route définies, selon une approche système, pour chaque priorité.

Priorités thématiques hiérarchisées proposées par l'ANCRE.

Priorités	Déclinaison	Thèmes/Domaines	Niveau de priorité par rapport aux moyens affectés actuels
Priorité 1: Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique	Priorité 1.1: Stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs, réseaux intelligents		++
	Priorité 1.2: Efficacité énergétique des usages bâtiment, transport et industries	Bâtiment et ville durable	+
		Green IT	+
		Transport et mobilité	+
		Industrie	=
	Priorité 1.3 : développement des filières ENR	Biomasse Gen2 et Gen3	+
		Solaire	+
		EMR	=
		Géothermie	+
Priorité 2 : Jouer des atouts compétitifs des filières énergétiques majoritaires dans le bouquet énergétique national et veiller à la sécurité d'approvisionnement des ressources stratégiques	Priorité 2.1: Optimisation des ressources énergétiques et minérales stratégiques	Ressources énergétiques non conventionnelles (hydrocarbures, hydrogène natif, etc.)	++
		Métaux stratégiques	++
	Priorité 2.2 : Une énergie nucléaire durable et sûre	Fission	=
		Fusion	=
Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique	Priorité 3.1: Efficacité énergétique : gestion de la chaleur fatale		++
	Priorité 3.2 : Capture stockage valorisation CO ₂		+
Priorité 4 : Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables aux investissements nécessaires			+
Priorité 5 : Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie			++

Contribution de l'ANCRE à la Stratégie Nationale de Recherche dans le domaine de l'énergie

Sommaire

Résumé exécutif	2
1. Introduction.....	14
2. Analyse des enjeux et contexte.....	16
2.1 Enjeux liés à la transition énergétique en France et à la dynamique internationale en matière de politiques énergétiques.....	16
2.1.1 La problématique énergétique	16
2.1.2 Convertir la transition énergétique en opportunité de renforcement de l'économie française	17
2.2 La R&D dans le domaine énergétique : situation française et contexte européen.....	19
2.2.1 Moyens dévolus à la R&D en France	19
2.2.2 Une diversité d'outils couvrant un large spectre de besoins, de la recherche la plus amont jusqu'à la recherche la plus appliquée	21
2.2.3 Un redéploiement de l'effort de recherche public vers les nouvelles technologies de l'énergie.....	22
2.2.4 Les axes d'amélioration.....	23
2.3 Le levier communautaire	23
2.3.1 La politique européenne dans le domaine de l'énergie monte en puissance et se structure	23
2.3.2 Les perspectives ouvertes par H2020.....	24
2.3.3 L'alignement entre la proposition de SNR(E) et la stratégie H2020 ouvre la voie à une meilleure utilisation par la France de la dynamique communautaire	25
2.4 Analyse stratégique de la R&D française dans l'énergie	27
3. Orientations stratégiques	28

3.1	Objectifs d'une Stratégie Nationale de Recherche dans le domaine énergétique.....	28
3.2	Quelle structuration des priorités de la SNR(E) ?	29
3.2.1	Une indispensable approche système des domaines thématiques à couvrir	29
3.2.2	L'apport des scénarios de transition énergétique comme outils de prospective structurants	30
3.2.3	Du recensement des verrous scientifiques et technologiques à leur inscription dans une stratégie de recherche cohérente	32
3.3	Quels outils mobiliser pour mettre en œuvre cette stratégie de façon optimale?.....	35
3.3.1	Constat : une dynamique de structuration des acteurs nationaux de la recherche publique en énergie à inscrire dans la durée.....	35
3.3.2	Constat : un déficit de prospective énergétique.....	36
3.3.3	Constat: un rayonnement améliorable de la R&D nationale en matière d'énergie	37
3.3.4	Constat: un rôle de la R&D à amplifier dans la promotion des intérêts industriels et économiques français en lien étroit avec les filières stratégiques existantes ou en devenir	38
3.3.5	Constat: un besoin de formations spécialisées en énergie	42
4.	Priorités thématiques proposées.....	43
4.1	Priorité 1: Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique.....	43
4.1.1	Priorité 1.1 : Stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs	43
4.1.2	Priorité 1.2 : Efficacité énergétique des usages bâtiment, Green IT, transport et industries.....	44
4.1.3	Priorité 1.3 : Développement des filières ENR.....	47
4.2	Priorité 2: Jouer des atouts compétitifs des filières énergétiques actuellement majoritaires dans le bouquet national et veiller à la sécurité d'approvisionnement des ressources stratégiques.....	50
4.2.1	Priorité 2.1 : Optimisation des ressources énergétiques et minérales stratégiques	50
4.2.2	Priorité 2.2 : Une énergie nucléaire durable et sûre	51
4.3	Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique	53

4.3.1	Priorité 3.1 : Captage-transport-stockage et valorisation du CO ₂	53
4.3.2	Priorité 3.2 : Efficacité énergétique : gestion de la chaleur fatale.....	54
4.4	Priorité 4 : Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables à la mise en œuvre des investissements nécessaires.....	55
4.5	Priorité 5 : Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie	56
5.	Tableau de synthèse des priorités pour la SNR(E).....	58

Contribution de l'ANCRE à la Stratégie Nationale de Recherche dans le domaine de l'énergie

1. Introduction

En décembre 2012, la Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a exprimé son vœu de renforcer le rôle des Alliances et du CNRS dans l'élaboration de la Stratégie Nationale de Recherche (SNR) qui sera mise en place à l'occasion de la future loi d'orientation de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. A l'instar des autres Alliances, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE) a été sollicitée en février dernier pour apporter sa contribution à cette élaboration.

Créée en 2009 par quatre membres fondateurs (CEA, CNRS, CPU et IFPEN) représentés au sein de son comité de coordination, l'ANCRE rassemble aujourd'hui tous les organismes publics de recherche (19) concernés par la problématique de l'énergie. Elle a vocation à favoriser la coordination de la programmation scientifique à travers notamment la recherche de partenariats et de synergies entre organismes publics de recherche, acteurs académiques et industriels et une vision partagée des verrous scientifiques, technologiques, économiques et sociétaux qui entravent les développements industriels dans le domaine de l'énergie.

Afin de répondre à la demande de la Ministre de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, l'Alliance a mis en place un groupe de travail dédié (GT SNR), constitué des représentants mandatés du CEA, du CNRS, de la CPU et de l'IFPEN.

Le groupe de travail s'est tout d'abord attaché à identifier, sur le fondement d'une analyse des forces et faiblesses de la recherche française et du tissu industriel national, les principes et les priorités qu'il était possible de retenir pour la définition d'une Stratégie Nationale de Recherche en cohérence avec les orientations communautaires définies dans « Horizon H2020 » et qui permette d'atteindre les objectifs assignés:

- De renforcement du rayonnement de la recherche scientifique française en Europe et dans le monde,
- D'efficacité maximale en termes d'impact économique pour la France et de compétitivité de ses industriels.

L'ANCRE s'est attachée à proposer une contribution visant à répondre en premier lieu au défi de société intitulé « Une énergie propre, sûre et durable ». Les propositions figurant dans ce document contribuent également au défi « Mobilité et systèmes urbain durables » à travers une approche ciblée sur les aspects technologiques spécifiquement liés à l'énergie². Le défi « Stimuler le renouveau industriel » est également traité sous l'angle de la contribution de la R&D à favoriser la pérennité des acteurs industriels majeurs de l'énergie, le développement d'un tissu industriel compétitif et la maîtrise du coût de l'énergie pour l'économie française. Certains points de vigilance sont également identifiés afin de favoriser le déploiement industriel. Les défis « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique », « Sécurité alimentaire, défi démographique et bio-économie » et « Société de l'Information et de la

² Ces propositions visent essentiellement le transport routier et viennent en complément des travaux du PREDIT et autre structures dédiées en matière de stratégie de recherche (CORAC, CORICAN,...)

communication ³» sont également abordés dans la mesure où les avancées dans ces domaines sont de nature à contribuer de façon importante à celui d'une énergie propre, sûre et durable.

La contribution présentée ci-après par l'ANCRE met en évidence les atouts sur lesquels la France peut s'appuyer pour développer une Stratégie Nationale de Recherche permettant de tirer le meilleur parti de la transition énergétique envisagée (II) et les axes d'amélioration du système de recherche et d'innovation dans le domaine de l'énergie (III). Enfin, elle propose des priorités thématiques pour lesquelles sont décrits les enjeux majeurs et verrous technologiques à lever (IV).

La stratégie proposée résulte de travaux réalisés par les dix groupes programmatiques d'ANCRE et d'une réflexion stratégique destinée à replacer la vision technologique des verrous dans une approche plus globale. Elle a également bénéficié des travaux conduits récemment sous l'égide conjointe de la Direction Générale de l'Energie et du Climat (MEDDE) et de la Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation (MESR), auxquels l'ANCRE a été associée aux côtés de l'ADEME et du CGDD, en vue de la préparation de la Stratégie Nationale de Recherche dans l'Energie prévue par l'article 10 de la loi du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique. Cette démarche a été adoptée afin de favoriser la cohérence entre les exercices menés.

Les pôles de compétitivité et un ensemble d'industriels concernés ont été appelés à formuler des commentaires et propositions qui sont pour partie intégrés dans ce travail ou le seront dans les réactualisations qui en seront faites régulièrement au cours des prochaines années.

³ Ce défi a donné lieu à une contribution commune de l'ANCRE et d'Allistène dont il est tenu compte dans ce présent document.

2. Analyse des enjeux et contexte

2.1 Enjeux liés à la transition énergétique en France et à la dynamique internationale en matière de politiques énergétiques

2.1.1 La problématique énergétique

Dans les décennies qui viennent, quels que soient les efforts, d'efficacité et de sobriété énergétiques, la demande d'énergie mondiale va continuer à augmenter de manière drastique sous l'effet de la pression démographique et de la croissance économique des puissances émergentes. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la demande mondiale devrait ainsi croître de plus d'un tiers d'ici 2035 satisfaite encore à cet horizon pour les trois-quarts par les énergies fossiles. Dans un contexte probable de prix de l'énergie durablement élevé, cette évolution pose un quadruple défi, de sécurité énergétique, de préservation de l'environnement, de limitation du risque climatique et de gestion économe de matières premières appelant une transition vers un nouveau bouquet énergétique mondial reposant sur une plus grande efficacité énergétique, une plus grande sobriété énergétique et sur la montée en puissance des énergies bas-carbone.

Etre en mesure de sécuriser les approvisionnements, de s'appuyer autant que possible sur des ressources et capacités nationales et de développer des technologies toujours plus innovantes et compétitives constitue un objectif majeur pour renforcer un tissu industriel national performant, notamment sur la scène internationale.

La France s'appuie d'ores et déjà sur des filières industrielles énergétiques de tout premier plan au niveau international (hydrocarbures, nucléaire, transformation et gestion de l'énergie, etc.) garantant d'un approvisionnement énergétique et électrique sécurisé. Elle dispose d'un mix électrique peu carboné et compétitif reposant sur le nucléaire et l'hydroélectrique. En revanche, elle doit importer la quasi-totalité de sa consommation d'énergies fossiles et en particulier d'hydrocarbures dont le transport (mobilité) reste très largement dépendant.

Il s'agit aujourd'hui d'aller vers un nouveau modèle énergétique plus sobre et plus efficace, garant du maintien d'un coût de l'énergie compétitif et peu émetteur de gaz à effet de serre. Cette dynamique s'inscrit en partie dans un cadre communautaire, à travers le triple engagement pris par la France en 2008 de réduire de 20% ses émissions de gaz à effet de serre ainsi que sa consommation énergétique et de recourir à hauteur de 23% aux énergies renouvelables, d'ici 2020. A l'horizon plus lointain de 2050, l'objectif en matière d'émissions de gaz à effet de serre est de diviser par 4 les émissions françaises (versus 1990). C'est dans ce cadre que s'est engagé en septembre 2012 un débat national sur la transition énergétique.

Quelles que soient les trajectoires qui seront retenues, les moyens à mettre en œuvre, qui relèveront d'une panoplie d'instruments très large, devront permettre (i) de réduire la demande d'énergie par l'efficacité en ciblant l'ensemble des usages, (ii) de renforcer l'utilisation des énergies renouvelables, (iii) de garantir, au moindre coût, l'équilibre demande-offre du système énergétique à chaque instant.

A l'appui de ces objectifs, de nombreuses technologies devront être mobilisées qu'elles relèvent :

- de l'efficacité et de la sobriété énergétiques dans le bâtiment, le transport ou dans l'industrie,
- des filières de production d'énergies renouvelables (solaire, éolien et marin, bioénergies, géothermie),
- de l'optimisation du système énergétique, qu'il s'agisse du stockage de l'énergie, de la conversion entre vecteurs énergétiques – y compris via la filière de l'hydrogène- ou de la gestion des réseaux (déploiement de réseaux intelligents).

On peut noter que les technologies de l'information et de la communication, déjà largement à l'œuvre dans le secteur énergétique, seront appelées à jouer un rôle accru sur ces trois dimensions, appelant un renforcement des échanges entre ANCRE et Allistène⁴.

D'autres technologies pourront contribuer de façon majeure à l'atteinte des objectifs de la transition énergétique : d'une part la valorisation de la chaleur fatale, susceptible de réduire la consommation d'énergie et d'accroître globalement l'efficacité du système et d'autre part, le captage, le stockage et la valorisation du CO₂, permettant de diminuer les émissions concentrées de CO₂.

Enfin, quel que soit le scénario retenu à l'horizon 2050, le mix énergétique français devra s'appuyer sur une part significative de nucléaire dans la production d'électricité. Dans l'intervalle, le recours à une part sans doute non négligeable d'hydrocarbures restera nécessaire pour répondre aux besoins de la mobilité, du secteur de la pétrochimie ainsi que pour pallier l'intermittence de la production d'électricité renouvelable (solaire et éolienne particulièrement).

En lien avec la levée des verrous technologiques, la transition énergétique appelle l'instauration de nouveaux modes de régulation du système énergétique et une évolution de sa gouvernance, avec l'émergence de nouveaux acteurs, un déplacement – et une réorganisation- des rôles, pouvoirs et relations entre acteurs. L'étude des évolutions sociétales nécessaires est indispensable, tant pour tendre vers un système organisationnel efficace que pour accompagner le développement de technologies répondant à des besoins et préoccupations qui méritent d'être explorés au regard du contexte social, environnemental, économique, et des rapports de la société civile aux usages de l'énergie, ainsi qu'à la science et au progrès technologique.

2.1.2 Convertir la transition énergétique en opportunité de renforcement de l'économie française

L'un des défis de la transition énergétique est de limiter les impacts économiques délétères que sont susceptibles d'entraîner d'une part les importants efforts nécessaires en matière d'investissements (en matière de rénovation de bâtiments, de construction d'infrastructures, etc.) et d'autre part une évolution inéluctable à la hausse du coût de l'énergie. La recherche scientifique et technologique peut apporter des réponses à ce défi par le développement de technologies moins coûteuses globalement, plus économes en ressources, plus efficaces et en permettant une gestion plus efficiente du système énergétique.

⁴ ANCRE et Allistène ont élaboré une contribution commune pour l'élaboration de la SNR

Le rééquilibrage de la balance commerciale suppose par ailleurs que la réduction des importations d'énergie primaire fossile ne conduise pas à une importation des produits et services appelés par la transition. Il est ainsi essentiel de favoriser l'émergence de solutions et technologies innovantes et compétitives qui contribuent au développement de nouvelles filières industrielles françaises capables de répondre aux besoins nationaux et étrangers.

A cet égard, il apparaît important que les priorités définies dans la SNR(E) reflètent non seulement les besoins et perspectives de marché pour la France, mais également une vision des marchés mondiaux : le territoire national devrait être considéré comme un champ privilégié pour le développement de produits, néanmoins, il ne suffit pas – à l'exception de certains marchés de niches et/ ou services à ancrage territorial – pour répondre aux besoins d'activité et de croissance des entreprises françaises.

La prise en compte de la dimension sociétale des transitions énergétiques appelées à se produire dans les différents pays du monde devrait éviter l'écueil d'une vision trop centrée sur les systèmes de valeurs et modes d'organisation français, voire européens.

Face à ces défis, la R&D est considérée comme un atout majeur de compétitivité, et donc de création de richesses et d'emplois.

Il est à noter que cette démarche n'est pas spécifique à la France ; de nombreux pays, à l'instar des Etats-Unis ou de l'Allemagne, se sont engagés dans de nouvelles politiques énergétiques et s'attachent, notamment au moyen d'efforts significatifs en matière de R&D, à renforcer leurs secteurs industriels.

En 2009, l'American Recovery and Reinvest Act a injecté 74 G\$ dans l'économie américaine pour traiter les questions énergétiques. Une partie des financements est venue abonder les budgets R&D du département de l'énergie (DoE) et a permis de mettre sur les rails l'Advanced Research Projects Agency (ARPA-E), dont la création était inscrite dans l'« America Competes Act » de 2007). L'Agence est chargée, au sein du DoE, de promouvoir et financer la R&D de technologies avancées dans le domaine de l'énergie lorsqu'il s'agit de projets à la fois très prometteurs – capables d'amener des révolutions technologiques – et trop risqués pour être supportés uniquement par des opérateurs privés ou dans le cadre des programmes du DoE.

L'ARPA a également financé les premières années d'existence des « Energy Innovation Hubs », dont les trois premiers étaient dédiés à l'efficacité énergétique dans le bâtiment, la production de carburants à partir de la lumière et la modélisation et la simulation de réacteurs nucléaires. Deux « Hubs » se sont ajoutés, le premier consacré aux matériaux critiques, le second aux batteries et au stockage de l'énergie.

Au sein de l'Office of Science, des programmes spécifiques de recherche fondamentale, lancés en 2009, les « Energy Frontier Research Centers » visent à rassembler des scientifiques et ingénieurs de haut-niveau au sein d'équipes intégrées autour de grands défis énergétiques.

Au total, le dispositif public de recherche américain s'appuie sur une palette d'outils utilisés de façon cohérente autour d'objectifs clairement affichés de développement industriel. Cet effort de R&D est conforté par une approche intégrant, au-delà des verrous technologiques, l'ensemble des obstacles (réglementaires, sociétaux, etc.) à surmonter.

Ainsi, dans le domaine de l'énergie solaire, l'initiative Sunshot, lancée par le DoE en 2011, vise à développer une offre industrielle d'énergie solaire (photovoltaïque et solaire concentré) compétitive avec les capacités de production d'électricité conventionnelles à un horizon de 10 ans. Cet objectif suppose une réduction de 50 à 75% des coûts de production. Le programme s'étend de la recherche la plus fondamentale à la R&D industrielle, s'attachant également à réduire tant les coûts liés à la production que ceux liés aux processus réglementaires (autorisation, inspection, etc.).

En Chine, le 'White Paper on China Energy Policy' d'octobre 2012, réaffirme la volonté chinoise d'accompagner l'utilisation de ressources fossiles du développement de technologies propres pour le charbon ainsi que le soutien aux énergies nouvelles. Ces énergies, tout comme l'efficacité énergétique, la protection de l'environnement et les véhicules électriques, font partie des 7 secteurs émergents stratégiques pour l'industrie chinoise identifiés dans le Plan Quinquennal. Un fort soutien politique est promis pour ces industries stratégiques, incluant notamment des crédits à taux préférentiels accordés aux industriels de ces secteurs et des financements pour la R&D.

La stratégie nationale de R&D doit s'attacher à favoriser la consolidation des filières existantes, qui constituent des atouts nationaux, ainsi que l'émergence de nouvelles filières industrielles créatrices de valeur et d'emplois afin :

- De pouvoir disposer d'une offre technologique permettant de réduire la consommation énergétique,
- De fournir une énergie, suffisante, sure et compétitive dans un environnement mondial de plus en plus concurrentiel,
- D'être en capacité d'adapter, à tout instant, offre et demande énergétiques dans une logique « système » maîtrisée, y compris en tenant compte des contraintes induites par l'interconnexion du système énergétique français avec le système européen.

La SNR(E) est un élément clé de l'atteinte de ces objectifs en cohérence avec le soutien aux filières organisé au sein des comités stratégiques de filière⁵.

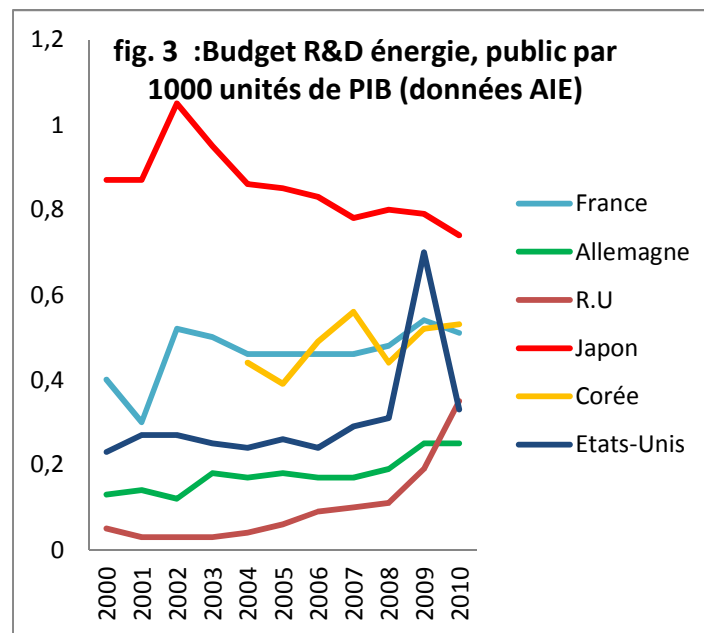
2.2 La R&D dans le domaine énergétique : situation française et contexte européen

2.2.1 Moyens dévolus à la R&D en France

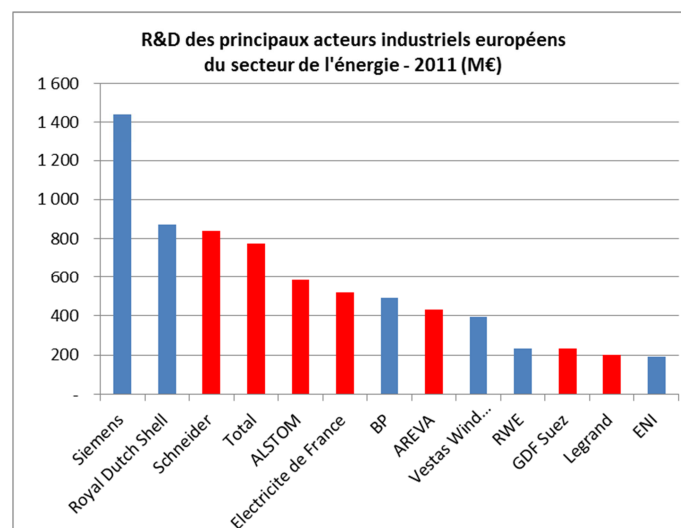
i. Un effort public significatif et une forte mobilisation des grands industriels français

Au regard de ses principaux compétiteurs membres de l'OCDE, la France, avec un budget public d'environ 1 G€/an, se situe, en termes d'effort rapporté au PIB (0,05%), dans une situation intermédiaire, proche de celle de la Corée. On peut noter toutefois les dynamiques de rattrapage, rapide du Royaume-Uni, le renforcement des efforts consentis par l'Allemagne et le pic lié à l'American Recovery and Reinvestment Act de 2009 dont a bénéficié la recherche américaine.

⁵ A ce jour, les filières concernées par l'enjeu « énergie » relèvent de trois comités stratégiques : comité stratégique des éco-industries, comité stratégique de la filière nucléaire, comité stratégique de la filière automobile.



L'industrie française est très présente dans la R&D du secteur énergétique : elle compte des champions nationaux (en rouge) qui, dans le graphe ci-dessous, pèsent 50% de la masse de R&D annuelle totale de tous les acteurs industriels européens représentés. En considérant ces acteurs, il est possible de donner une estimation de la part de recherche privée dans la recherche totale énergétique. Cette part est particulièrement forte en France (78%), alors qu'elle se situe autour de 75% en Allemagne. Toutefois, on notera que la masse de R&D publique annuelle dédiée à l'énergie est de 50% supérieure en France par rapport à l'Allemagne et donc que l'effort global fait par la France dans le domaine de la R&D sur l'énergie est notablement supérieur à celui de l'Allemagne.



Source : *The 2012 EU Industrial R&D Investment scoreboard*, p. 83 et s.⁶

⁶ NB : Pour Siemens et Alstom, qui sont des firmes multi-activités, la R&D reportée est une estimation sur la base de leur chiffre d'affaires dans la branche énergie.

Cette répartition entre effort public et effort privé met la France dans une situation proche de celle des Etats-Unis.

En revanche, il est à noter qu'elle est essentiellement portée par les grandes entreprises, contrairement au modèle allemand. Les PME et ETI françaises ont ainsi moins accès à l'innovation technologique.

ii. Les composantes de la R&D publique

Dans le domaine de l'énergie, la France s'est dotée d'organismes de statuts variés, dont les missions sont complémentaires.

Le CNRS, avec les universités, couvrent l'ensemble des domaines de la recherche scientifique.

Les établissements publics industriels et commerciaux (CEA, IFPEN, IFREMER, BRGM etc.), statutairement spécialisés, développent des recherches scientifiques et technologiques dans le champ de leurs missions et entretiennent des relations très étroites avec le secteur industriel. La proximité entre R&D et secteur économique trouve une traduction dans la part de recettes externes dans le budget de ces établissements (31% pour les activités civiles du CEA en 2011, 53% pour IFPEN en 2012, 55 % pour le BRGM en 2011).

Il est à noter que les compétences de ces organismes, pour ce qui concerne le domaine de l'énergie, sont essentiellement axées sur la recherche technologique et/ou la formation. Les sciences humaines et sociales prennent cependant une part croissante.

La dimension partenariale entre recherche publique et entreprises – en vue d'une accélération de la diffusion de l'innovation- est encouragée, notamment à travers le label des « Instituts Carnot »⁷ mais aussi via les Instituts d'excellence dans le domaine des énergies décarbonées (IEED), les Instituts de recherche technologique (IRT) et les pôles de compétitivité. Les Instituts Carnot du domaine de l'Energie pèsent environ 43% du total des Institut Carnot. Si l'on y ajoute les fortes relations partenariales existant dans les domaines du nucléaire⁸ et des hydrocarbures, on constate que les relations partenariales sont particulièrement développées dans le domaine de l'énergie comparativement aux autres domaines industriels. Il s'agit là d'un atout majeur qu'il convient de développer encore, notamment sur le plan des relations avec les PME et ETI.

2.2.2 Une diversité d'outils couvrant un large spectre de besoins, de la recherche la plus amont jusqu'à la recherche la plus appliquée

Outre les dotations budgétaires attribuées aux organismes de recherche (qui financent principalement leurs recherches non matures, à risque ou de long terme) et les ressources propres tirées de leurs activités, différentes sources de financement sont distribuées, pour l'essentiel à travers deux agences de programme : Agence Nationale de la Recherche (ANR) axée sur la recherche fondamentale et ADEME, couvrant les phases de recherche industrielle et démonstrateurs. Aux budgets modestes, environ 40 M€ pour les projets relevant du programme

⁷ <http://www.instituts-carnot.eu/fr/offre-de-competences-des-instituts-carnot-pour-les-entreprises>

⁸ cf. rapport de la cour des comptes 2012 sur les coûts du nucléaire

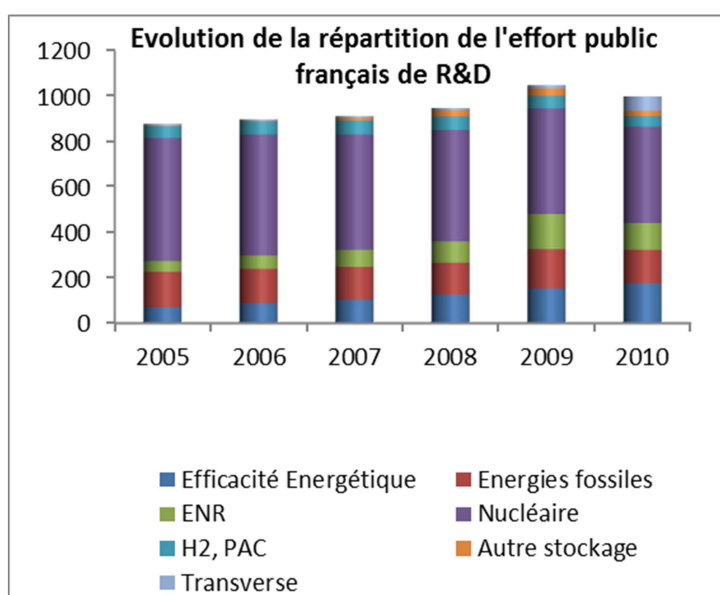
« Energies Durables » de l'ANR et autant pour l'ADEME, s'ajoutent depuis 2009, les financements relevant du **Programme des Investissements d'Avenir** (près de 6 G€ inscrits pour des actions dans le domaine de l'énergie).

L'innovation dans les entreprises fait également l'objet d'un soutien significatif à travers les outils de financement de la Banque Publique d'Investissement, en particulier les fonds « d'Innovation stratégique industrielle » (programmes « ISI », 107 M€/an) et le « fond unique interministériel » (programme « FUI », 214 M€/an), ce dernier étant utilisé via les pôles de compétitivité et tous deux étant positionnés sur la recherche appliquée et le développement expérimental. En considérant la part des fonds perçus par les pôles de compétitivité dédiés à l'énergie, il est possible d'avancer une estimation de l'ordre de 26%, dédiée à l'énergie. OSEO apporte également son soutien à travers un programme d'aides à l'innovation. Le Fonds Ecotechnologies, créé en 2012 et géré par la CDC, répond à la problématique du financement du passage à la phase industrielle constatée dans le domaine des technologies vertes.

Un soutien est également apporté pour renforcer **l'attractivité de la recherche**, incluant le dispositif de financement des thèses « Conventions Industrielles de Formation par la Recherche » (CIFRE, 52 M€/an), dont 18% est dédié aux entreprises du secteur énergétique et le soutien aux « laboratoires d'excellence » (fonds doté d'1 G€), dont 10 mènent des recherches dans le domaine de l'énergie.

2.2.3 Un redéploiement de l'effort de recherche public vers les nouvelles technologies de l'énergie

Si l'effort public de R&D français est relativement stable depuis quelques années, **la répartition entre secteurs applicatifs a fortement évolué pour donner une place plus importante à l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables** (solaire essentiellement) et au vecteur hydrogène et autres technologies de stockage de l'électricité et autres programmes transverses, avec un recul des efforts dédiés au nucléaire (-22% entre 2005 et 2010) et, dans une moindre mesure, aux énergies fossiles (-7% entre 2005 et 2010)⁹.



⁹ Source : Agence Internationale de l'Energie (budgets de R&D nationaux par secteur)

2.2.4 Les axes d'amélioration

Contrairement aux Etats-Unis (ex : Sunshot) ou au Royaume-Uni (Grand Challenge Programs), la lisibilité des grands défis ou programmes de recherche apparaît faible. Une plus grande visibilité de quelques grands défis serait fédératrice et favorable à une meilleure synergie entre les efforts consentis.

A l'instar des pratiques de nos concurrents économiquement les plus dynamiques (USA, Corée, Allemagne, etc.), il apparaît indispensable de jouer de la complémentarité entre les approches top-down (permettant de soutenir l'innovation dans les filières) et bottom-up (destinée à favoriser l'émergence de ruptures technologiques).

Enfin, l'attention portée à **la compréhension des comportements et des attentes sociétales reste trop marginale et insuffisamment intégrée** dans la réflexion sur le déploiement de nouvelles technologies en liaison avec de nouveaux usages.

2.3 Le levier communautaire

2.3.1 La politique européenne dans le domaine de l'énergie monte en puissance et se structure

A l'échelle de la zone européenne, il est à noter que le niveau de dépenses de R&D pour l'énergie consenti par les pays de l'OCDE (4,3 G€ en 2011) dépasse désormais celui des Etats-Unis.

S'agissant de l'Union européenne, l'importance accordée à la question énergétique se traduit à travers ses propositions en matière de politique industrielle et régionale ainsi que dans sa politique de R&D, notamment à travers le plan stratégique de l'Union européenne pour les technologies énergétiques (SET-plan) lancé en 2008 pour promouvoir les technologies correspondant aux politiques de l'Union en matière d'énergie et de climat.

Au total, les investissements publics et privés dans le développement technologique pour les secteurs du SET-Plan sont passés de 3,2 G€ en 2007 à 5,4 G€ en 2010, dont 70 % supportés par les entreprises.

Cet effort est déployé à travers:

- 6 Initiatives Industrielles Européennes (EII), dédiées respectivement à l'éolien, au solaire, aux bioénergies, aux réseaux électriques, au nucléaire et au captage- stockage du CO₂, qui ont défini des thèmes prioritaires de recherche et d'innovation inscrits dans des feuilles de route technologiques et ont centré leur activité sur des grands projets de valeur européenne,
- l'entreprise conjointe « Hydrogène et pile à combustible » (FCH JU),
- l'Alliance Européenne de la Recherche dans le domaine de l'Energie (EERA), dont la vocation est d'assurer la cohérence des efforts conduits au niveau européen par les organismes de recherche et par les Etats-membres.

Les instruments communautaires R&D pour l'énergie incluent par ailleurs les plates-formes technologiques (ETP) chargées d'établir des feuilles de route industrielles sur des thématiques ciblées (comme, par exemple, Zero Emission Fossil Fuel Power Plant (ZEP), European Smartgrids Technology Platform ou European Biofuels Technology Platform (EBTP)) et les communautés de la connaissance et de l'innovation (KIC Innoenergy, auxquelles vont s'ajouter, dans le cadre H2020, les KIC Matière Première et Fabrication Avancée).

Les financements se répartissent de la façon suivante :

R&D et démonstration :

- Programme-cadre (FP7) : 2,21 G€ (hors JTI) entre 2007 et 2013,
- JTI FCH-JU (Fuel Cells and Hydrogen) : 450 M€ entre 2008 et 2013,
- Euratom fission et fusion (hors ITER) : 1G€ entre 2007 et 2013

Innovation, transfert de technologie : KIC Innoenergy (EIT): 150 M€ entre 2009 et 2013

Démonstration à l'échelle commerciale : NER 300 : 1,2 G€ de subventions (fonction du prix de la tonne de CO₂) pour le premier appel, le 2ème est en cours ;

Industrialisation : financement BEI, passé de 4 G€ en 2006 à 14,6 G€ de volume d'opérations de financement dans l'énergie en 2010 (essentiellement prêts), notamment à travers le RSSF (mécanisme de financement du partage de risque) ;

Innovation non technologique : Programme Energie Intelligente Europe du programme CIP (Competitiveness and Innovation Programme) : 730 M€ entre 2007 et 2013. Ce programme sera fusionné avec le programme-cadre dans le contexte H2020.

A ces budgets peut être ajouté celui de la **politique de Cohésion** (dont les fonds Feder) : 9,4 G€ pour l'énergie sur la période 2007-2013. Il peut couvrir les activités de R&D jusqu'à la démonstration et première application commerciale.

2.3.2 Les perspectives ouvertes par H2020

Un programme plus lisible et ambitieux

Le programme H2020 vise une simplification du dispositif en regroupant le programme commun de recherche et développement technologique (PCRD), Euratom, les actions pour l'innovation et la compétitivité (CIP) et la contribution de l'Union européenne à l'Institut Européen d'Innovation et de Technologie (IET).

Les objectifs que poursuit H2020 s'articulent autour de trois axes : (i) renforcer l'excellence de la base scientifique en Europe, (ii) contribuer à assurer la primauté industrielle de l'Union européenne, (iii) apporter des éléments de réponse aux défis sociétaux recensés dans la stratégie « Europe 2020 ».

La thématique énergie est très présente dans ces trois axes, avec notamment (i) l'instrument «Future and Emerging Technologies », (ii) l'efficacité énergétique comme thème moteur de la technologie générique clé « production avancée » avec les bâtiments et les procédés efficaces en énergie, (iii) les défis de société « Energies sûres propres et efficaces », mais aussi « Transports intelligents, verts et intégrés » et « Sécurité alimentaire, agriculture durable, recherche marine et maritime et bio-économie ». Cette thématique est soutenue par un **budget global dédié qui devrait être en forte augmentation par rapport à la période de programmation précédente** (2007-2013). A titre d'exemple, le montant destiné au défi « Energies sûres propres et efficaces » devrait être de l'ordre d'au moins 5 G€ (incluant la JTI «hydrogène et piles à combustible »), à rapprocher des 2.66G€ du FP7. Ce budget permet, sans réduire les efforts dans le domaine de l'énergie nucléaire (fission et fusion), d'accroître significativement la R&D dans les nouvelles technologies de l'énergie (NTE).

Des priorités thématiques clairement affichées

La mise en œuvre d'H2020 pour la période 2014-2016 s'appuie sur un premier programme stratégique qui identifie 12 priorités dont 5 sont en lien avec la transition énergétique :

- Villes et communautés intelligentes,
- Energie bas carbone compétitive : énergies renouvelables et nucléaire sûr,
- Efficacité énergétique,
- Mobilité pour la croissance,
- Déchets : une ressource à recycler, réutilisation et récupération de matière première.

Un renforcement du SET-Plan axé sur le développement industriel

Concernant le SET-Plan, la Commission européenne recommande de mettre davantage l'accent sur **l'intégration du système énergétique et sur l'intégration des activités dans la chaîne d'innovation** - de la recherche fondamentale à la commercialisation- et de renforcer la coordination entre les EII et l'EERA en liaison avec ces objectifs.

Plus largement, en matière de stratégie pour les technologies et l'innovation énergétiques, laquelle s'appuyant essentiellement sur le SET-Plan, les développements clés identifiés concernent :

- La réalisation du potentiel d'efficacité énergétique, en privilégiant la consommation finale,
- Une offre de solutions compétitives pour un système énergétique propre, durable, sûr, efficace et bas carbone, incluant des aspects réseaux/système (y compris hydrogène et PAC) et offre (filiales ENR dont géothermie solaire, éolien offshore, énergies marines, nucléaire fission, nucléaire fusion, biocarburants) et CSCV,
- La promotion de l'innovation en environnements réels, dans un cadre fondé sur le marché (solution urbaines intelligentes.. ; levée des verrous non technologiques, y compris en matière de solutions de financement et de climat d'affaires pour les entreprises).

Un appel au développement de coopérations internationales

Parmi les préconisations pour la mise en œuvre de sa stratégie, la Commission suggère de renforcer les coopérations avec les Etats-Unis, le Japon et la Chine, qui mènent également des programmes importants pour la réduction de leurs émissions de CO₂, dans les domaines des réseaux intelligents, des piles à combustible et de l'hydrogène, des énergies renouvelables, de la sûreté nucléaire et de la fusion.

2.3.3 L'alignement entre la proposition de SNR(E) et la stratégie H2020 ouvre la voie à une meilleure utilisation par la France de la dynamique communautaire

Soulignons tout d'abord que le taux de retour de la France pour les projets financés dans le cadre du programme FP7 énergie ne s'élève qu'à 10 %.

Néanmoins, les performances sont meilleures dans les domaines des réseaux intelligents¹⁰ et de l'hydrogène et des piles à combustible (à travers la JTI) ainsi que dans le domaine du captage/stockage du CO₂. Enfin, le taux de retour de la France pour le programme Euratom Fission atteint 22%.

Par ailleurs et pour répondre aux enjeux du SET-Plan et préparer la nouvelle période de programmation 2014-2020, les organismes de recherche et universités françaises se sont fortement investis au sein des programmes conjoints de l'EERA avec :

- la coordination de trois programmes conjoints : le photovoltaïque, AMPEA (matériaux et procédés avancés pour l'énergie) et matériaux pour le nucléaire,
- l'implication dans les comités de coordination des programmes conjoints bioénergie, solaire à concentration, stockage de l'énergie et hydrogène et les piles à combustible.

Cette implication s'est traduite par la coordination d'un projet d'infrastructures regroupant des laboratoires européens sur la thématique photovoltaïque et par une bonne participation dans trois des cinq projets de recherche intégrée (IRP) du FP7 : solaire à concentration, photovoltaïque et matériaux pour le nucléaire. Ces IRP préfigurent les futurs instruments d'Horizon 2020.

Les organismes de recherche français sont, par ailleurs, fortement impliqués dans les plateformes technologiques européennes qui sont à l'origine des initiatives industrielles du Set-Plan (ZEP, EBTB, etc.).

Pour la période à venir, il sera important pour la recherche française de s'inscrire encore davantage dans la dynamique communautaire afin de bénéficier des synergies créées et de prendre toute la place à laquelle elle peut prétendre compte tenu de l'intensité des efforts publics consentis et de la qualité de ses chercheurs. Cette recommandation apparaît d'autant plus pertinente que l'expression des défis exposés dans le cadre de la stratégie « Europe 2020 » ainsi que celle des priorités du programme H2020 recouvrent en grande partie ceux de l'approche proposée dans la SNR(E).

Dans le cadre d'une approche plus stratégique de l'espace européen de la recherche, les synergies entre financements nationaux et européens devront être encouragées, notamment en mobilisant le FEDER, en cohérence avec la politique de spécialisation intelligente des régions...

Des objectifs ambitieux en termes de participation d'équipes de recherche françaises dans les projets européens pourraient être définis par secteur, en cohérence avec le positionnement et les ambitions françaises.

Enfin, au regard de lu défi de renforcement économique, l'ampleur du marché intérieur de l'énergie constitue un atout à exploiter. Au-delà de la R&D, ce constat invite au renforcement de la mobilisation française dans les instances communautaires travaillant à l'édiction des normes et standards.

¹⁰ Dans le cadre du FP7, une trentaine de projets de recherche et de démonstration Smart Grid sont aujourd'hui en cours pour un budget total de près de 300 M€. La France est impliquée dans plus de la moitié de ces projets, avec comme priorité l'interconnexion des réseaux, et le développement des TIC pour l'adaptation offre demande

2.4 Analyse stratégique de la R&D française dans l'énergie

Opportunités	Menaces
- Levier communautaire (et international) à exploiter - Positionnement de leader mondial dans certains domaines (nucléaire, hydrocarbures) - Acteurs publics de R&D et de formation internationalement reconnus pour leurs compétences - Liens étroits entre organismes de recherche et laboratoires universitaires (SFRI), - Implication de grands groupes industriels français dans le domaine de l'énergie	- Durabilité des politiques publiques de soutien financier dans le domaine des NTE et visibilité à long terme - Déficit d'articulation entre efforts de R&D, développement industriel et objectifs politiques, - Manque de visibilité sur le long terme (enchaînement des étapes de R&D), - Moyens financiers limités au regard de certains compétiteurs : Chine, Japon, Etats-Unis - Marché français insuffisamment attractif amenant les grands industriels à investir dans la R&D sur des marchés plus dynamiques
Forces	Faiblesses
- Excellence de la formation académique des chercheurs, de la recherche fondamentale à la démonstration, - Partenariat avec les entreprises - Réflexion R&D présente dans certains CSF - Rôle des EPIC pour renforcer le lien entre secteur académique et monde économique, - Rôle d'animation et d'échange des pôles de compétitivité	- Déficit d'articulation globale des outils - Déficit de sensibilité aux attentes des marchés, manque d'intégration des SHS, - Retard pris dans certains domaines, pesanteurs lors de la structuration des dispositifs de R&D - Manque de capacité à mobiliser des ressources rapidement face à l'émergence de nouveaux secteurs - Manque de partage de retour d'expérience (démonstrateurs) - Peu d'utilisation du levier communautaire

3. Orientations stratégiques

3.1 Objectifs d'une Stratégie Nationale de Recherche dans le domaine énergétique

Il ressort de l'analyse menée au chapitre II qu'en matière de recherche la France dispose d'atouts considérables pour relever le défi de la transition énergétique en lien avec plusieurs défis sociétaux connexes, qu'il s'agisse de la mobilité, de la société numérique, de l'environnement ou de la ré-industrialisation par l'innovation.

Dans un contexte budgétaire public très contraint et face à une situation dégradée de l'économie française, la Stratégie Nationale de Recherche dans le domaine de l'Energie (SNR(E)) doit promouvoir une vision de long terme pour optimiser les atouts de notre système énergétique national et contribuer à apporter des solutions technologiques à la problématique énergétique française des prochaines décennies avec l'innovation nécessaire à la vitalité et à la compétitivité du tissu économique français.

En réponse à la demande de la Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche dans son courrier du 20 février 2013, il est proposé que les efforts de recherche prioritaires soient ciblés sur quelques grandes priorités articulées avec les celles de H2020, dans le double objectif :

- d'accroître le rayonnement de la France en Europe et dans le monde
- de présenter une efficacité maximale en termes de retombées économiques pour la France et de compétitivité de ses entreprises industrielles.

Ces objectifs apparaissent d'autant plus importants qu'ils se placent dans la perspective d'une transition énergétique qui, pour être soutenable économiquement, doit renforcer les acteurs industriels stratégiques français du secteur de l'énergie et favoriser l'émergence de nouvelles filières en anticipant les ruptures technologiques qui assureront la compétitivité de nos entreprises sur la scène internationale.

La R&D publique, fédérée au sein de l'ANCRE, couvrant des domaines allant de la recherche fondamentale à la mise au point de démonstrateurs à des fins d'applications industrielles, a un rôle majeur à jouer pour permettre d'atteindre ces objectifs structurants pour le processus de transition énergétique. L'élaboration de la SNR(E) à l'appui de ce processus permettra aux acteurs de la recherche publique de s'insérer efficacement dans un environnement économique, social et environnemental complexe et de dynamique mondiale.

La SNR(E) devrait tout d'abord permettre de favoriser l'émergence des concepts innovants, incrémentaux ou de rupture, amenant de l'efficacité sur l'ensemble des systèmes énergétiques, avec une approche multi vecteurs (thermique, électrique, gaz, chimique, hydrogène). Cette approche permet d'établir une feuille de route scientifique et technologique prospective qui intègre les filières classiques (fossiles, nucléaire, ENR biomasse, éolien, solaire, géothermie, etc.) en lien avec les usages (bâtiment, transports, industrie) mais doit aussi prendre en compte la dimension système. Les vecteurs énergétiques sont les invariants du système énergétique, mais leur production, conversion, transport, stockage, utilisation, appellent de véritables ruptures vis à vis de cette dimension.

Recherche de base, technologique, pilote et démonstration sont nécessaires, pour tirer avantage de la complémentarité de ces vecteurs vis-à-vis d'une optimisation globale du système énergétique.

La SNE (E) devrait aussi permettre de conserver la compétitivité technologique et économique dans les domaines énergétiques, fortement exportateurs, où la France est aujourd'hui leader sur le plan international, et de contribuer à l'émergence de nouvelles filières industrielles dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie, tant en réponse aux besoins nationaux de la transition énergétique que dans une optique de créer les "champions énergétiques" de demain sur le plan international.

En outre, à côté des problématiques technologiques et en lien étroit avec celles-ci, dans le contexte d'une transition énergétique s'accompagnant de modifications profondes des comportements et des modalités de fonctionnement des marchés de l'énergie, un certain nombre de champs doit faire l'objet de recherches, notamment dans les domaines des sciences sociales et économiques afin de jouer efficacement sur l'ensemble des leviers. De même, les sciences de l'environnement devront être mobilisées, tant pour établir ex-ante les limites environnementales acceptables pour la production et la consommation d'énergie, que pour caractériser les effets des choix de bouquet énergétique.

Enfin, les dimensions territoriales d'une part et réglementaires d'autre part doivent être prises en compte au sein de la SNR(E). Ainsi, la capacité d'utiliser le territoire national pour mener des expérimentations, construire des démonstrateurs peut apporter un avantage précieux. Au-delà de la levée des verrous technologiques, une articulation efficace entre les différentes parties prenantes (administrations publiques, acteurs industriels, collectivités territoriales, société civile, financeurs...) est essentielle pour lever les obstacles de natures réglementaires, sociales, etc...

3.2 Quelle structuration des priorités de la SNR(E) ?

3.2.1 Une indispensable approche système des domaines thématiques à couvrir

L'obligation d'une transition énergétique permettant de relaxer la dépendance du système énergétique français aux coûts des importations d'hydrocarbures (solde négatif de 68 G€ en 2012), de limiter l'impact des gaz à effet de serre, d'améliorer l'efficacité énergétique et de fournir une énergie compétitive durablement impose de **considérer le système énergétique national globalement** et non simplement par le prisme de chacune des filières qui le composent.

Les trois axes suivants doivent ainsi être considérés conjointement:

- **L'utilisation efficace et sobre de l'énergie**, rassemblant les axes de travail portant sur la demande énergétique
- **La maîtrise d'une gamme de technologies permettant de produire de façon compétitive une énergie sûre et respectueuse de l'environnement**, concernant l'offre énergétique
- **L'optimisation du système énergétique**, visant l'adéquation entre offre et demande énergétiques.

Ces axes se déclinent en thématiques, comme l'illustre le schéma ci-après présentant l'ensemble du champ à couvrir pour la R&D dans une vision de politique énergétique répondant à l'attente sociétale d'une énergie propre, sûre et efficace, et, d'une mobilité et de systèmes urbains durables.

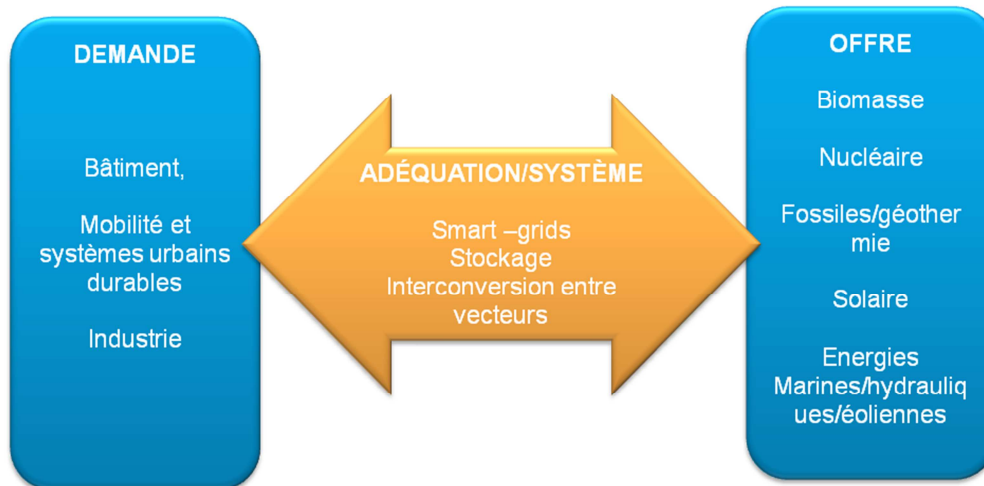


Figure 1 : Vision du champ thématique à couvrir en réponse aux enjeux sociétaux

Sur les différentes thématiques, l'ANCRE a analysé les verrous scientifiques et technologiques à lever dans un document intitulé « Verrous scientifiques et technologiques de la transition énergétique », rendu public en décembre 2012.

3.2.2 L'apport des scénarios de transition énergétique comme outils de prospective structurants

Les réflexions actuellement menées sur la transition énergétique considèrent les évolutions possibles et/ou nécessaires du système énergétique français.

En sus de la préservation des atouts économiques indéniables que la France tire dans quelques domaines du système actuel, la R&D menée, en particulier sur les fonds publics, doit en priorité se focaliser sur les verrous scientifiques et technologiques conditionnant la réussite de la transition énergétique.

L'ANCRE apporte une contribution au Débat National sur la Transition Énergétique par l'élaboration de différents scénarios destinés à étudier les conditions dans lesquelles l'engagement français et européen de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, pourrait être tenu et plus précisément, à identifier les technologies à mobiliser et les verrous technologiques à lever pour atteindre cet objectif.

Dans ce travail l'ANCRE a pris en considération dans ses scénarios de référence :

- l'engagement d'atteinte d'un facteur 4 de réduction des émissions de CO₂ liées à l'énergie, en cohérence avec l'engagement international de notre pays,
- l'ambition du Gouvernement de ramener la part du nucléaire dans la production électrique nationale, de 75% actuellement à 50% en 2025.

Partant de ces éléments de cadrage extrêmement ambitieux, l'ANCRE a défini trois scénarios décrivant trois visions contrastées d'un futur énergétique décarboné pour la France en 2050 :

- Un scénario « Sobriété renforcée » reposant essentiellement sur le triptyque **sobriété renforcée, efficacité énergétique poussée et développement des énergies renouvelables**,
- Un scénario « Décarbonisation par l'électricité », fondé sur la combinaison d'un effort d'**efficacité énergétique et d'un accroissement dans les usages de la part de l'électricité, qu'elle soit d'origine renouvelable ou nucléaire**,
- Un scénario « Vecteurs diversifiés », misant sur **l'efficacité énergétique, un renforcement limité des usages électriques**, l'accent étant largement mis sur la **diversification des sources et vecteurs d'énergies** et sur un rôle important **des systèmes énergétiques intégrés développés localement**.

A ce stade, en amont des évaluations économiques qui seront conduites par l'ANCRE d'ici à l'automne, il apparaît possible à travers les scénarios proposés d'atteindre l'objectif du « facteur 4 ». Néanmoins, ce résultat n'est envisageable qu'à la condition de lever des verrous dans deux domaines majeurs quel que soit le scénario et d'introduire au moins une rupture technologique majeure pour chacun d'entre eux.

Les deux domaines qu'il faudra investir pour tous les scénarios, constituant ainsi des « invariants », concernent :

- **La réalisation des gains attendus en matière d'efficacité et de sobriété énergétiques,**
 - Efficacité énergétique dans le bâtiment,
 - Véhicules peu émetteurs de gaz à effet de serre (véhicules consommant moins de 2l/100 km de carburant fossile, véhicule électrique (batteries et H2)),
 - La poursuite de l'amélioration de l'efficacité énergétique industrielle.
- **La gestion de l'impact de la montée en puissance des énergies renouvelables intermittentes pour la production d'énergie et son utilisation**
 - Stockage,
 - Réseaux intelligents,
 - Suivi de charge des centrales nucléaires,
 - Développement de nouveaux vecteurs énergétiques à production interruptible¹¹,

S'agissant des ruptures majeures, on notera que :

- Le scénario « Sobriété renforcée » suppose de recourir massivement au captage du CO₂, pouvant conduire à son stockage ou à sa valorisation,
- Le scénario « Décarbonisation par l'électricité » exige de disposer de moyens de stockage réversible de l'électricité de très grande capacité,
- Le scénario « Vecteurs diversifiés » table sur un recours à des vecteurs énergétiques flexibles
 - Biomasse (liquide) de seconde génération,
 - Vecteur gaz, produit si possible sans recours aux fossiles (biogaz, hydrogène, méthane),
 - Récupération de la chaleur fatale.

¹¹ Ce concept renvoie à l'optimisation du système énergétique par utilisation de l'électricité pour produire d'autres vecteurs (H₂, méthane...) lors des pointes de production

Par ailleurs, dans tous les scénarios, il est prévu que d'une part, le poids des énergies renouvelables intermittentes pour la production d'électricité croisse de façon significative, appelant à des améliorations de ces filières technologiques (solaire, éolien, énergies marines renouvelables (dont éolien offshore) et d'autre part, la contribution de l'énergie nucléaire reste importante. Enfin, bien que le recours aux énergies fossiles soit appelé à baisser, la question de la sécurité de leur approvisionnement (et d'une exploitation des ressources nationales) et plus généralement celle des matières premières critiques - ayant un rôle considérable dans le développement des nouvelles technologies de l'énergie- reste posée. Ainsi, au-delà des efforts nécessaires, pour favoriser l'émergence de filières ENR compétitives, les résultats des scénarios montrent l'importance de préserver la pérennité des contributeurs majeurs à la production d'énergie en France.

3.2.3 Du recensement des verrous scientifiques et technologiques à leur inscription dans une stratégie de recherche cohérente

A ce stade, on peut noter, pour les axes « demande énergétique », « offre énergétique » et « adéquation offre/demande », un bon recouvrement entre les thématiques prioritaires identifiées par l'ANCRE dans le document sur les verrous, cité plus haut et celles mises en avant par le travail de prospective mené sur les scénarios.

Les travaux qui restent à mener concernant les scénarios –évaluation des impacts et conditions nécessaires au regard d'une batterie de critères – permettront de mettre en évidence des problématiques relevant des domaines de l'économie (investissements, impacts sur les prix, etc.), de la sociologie et de la réglementation notamment. Ces problématiques ont naturellement vocation à être intégrées dans les thèmes faisant l'objet d'activités de recherche menées dans la durée au sein de la SNR(E).

Il convient également de rappeler que s'il est essentiel que tant les acteurs majeurs du secteur énergétique français que de nouveaux acteurs bénéficient des opportunités créées par la transition énergétique, il est tout aussi important d'adopter une vision internationale des marchés, de leurs perspectives et de la capacité des industriels français à renforcer leur positionnement face à une concurrence mondiale dans le cadre d'une stratégie nationale de recherche.

La SNR(E) doit couvrir les différents aspects regroupés dans le schéma ci-dessous :

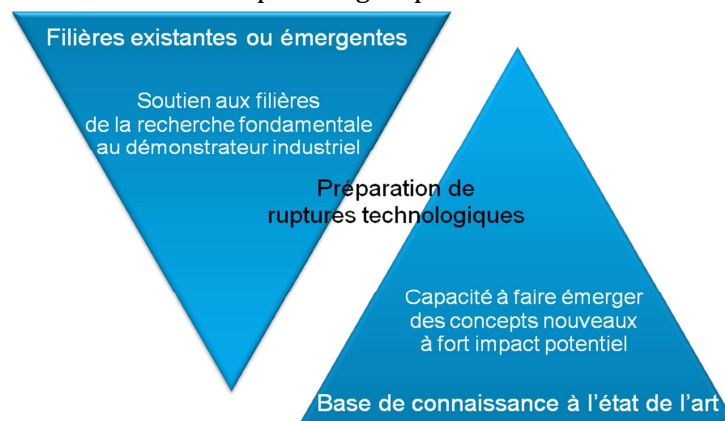


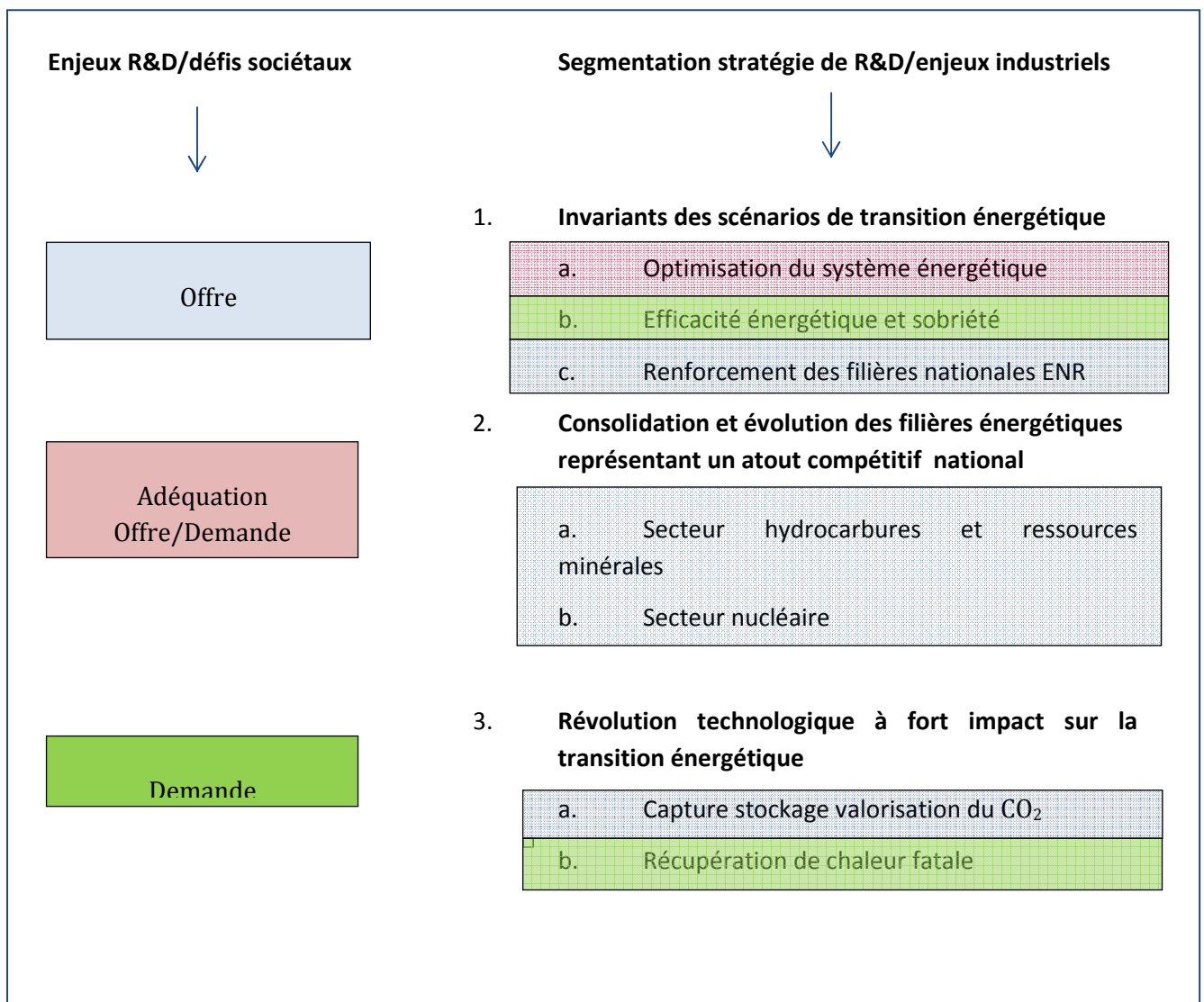
Figure 2 : Démarche couplée top-down et bottom-up à mettre en place au sein de la Stratégie Nationale de Recherche sur l'Energie

Afin de constituer une segmentation cohérente et efficiente de l'ensemble de la Stratégie nationale de recherche sur l'énergie, il apparaît pertinent de proposer une articulation des différents verrous et défis technologiques selon une logique reflétant la nature des enjeux.

Sur la base de cette analyse, il est proposé de fixer les **5 domaines suivants** comme prioritaires pour maximiser à la fois l'efficacité de la SNR(E) et son impact économique, et améliorer au plan européen et international le rayonnement et la position de la R&D nationale:

1. **Invariants des scénarios de transition énergétique** [Enjeu de faisabilité de la transition énergétique sur son volet technologique en soutien aux filières innovantes]
 - a. Efficacité énergétique et sobriété
 - b. Renforcement des filières nationales ENR
 - c. Optimisation du système énergétique - permettant notamment d'intégrer une part significativement augmentée d'ENR intermittentes - par le développement du stockage, de l'inter-conversion entre vecteurs énergétiques et des réseaux intelligents.
2. **Consolidation et évolution des filières énergétiques actuellement majoritaires dans le bouquet énergétique national** [Enjeu de compétitivité internationale]
 - a. Secteur hydrocarbures et ressources minérales
 - b. Secteur nucléaire
3. **Révolution technologique à fort impact potentiel sur la transition énergétique** [Enjeu d'accélération possible de la transition énergétique]
 - a. Captage, transport, stockage et valorisation du CO₂
 - b. Récupération de la chaleur fatale
4. **Connaissances des marchés et des comportements** [Enjeu de prise en compte des aspects non technologiques conditionnant l'évolution du système énergétique].
5. **Concepts scientifiques innovants pour l'énergie** [Enjeu de maintien d'un socle de savoir aux frontières des connaissances et de la capacité à le mobiliser, dans une approche interdisciplinaire pour faire émerger des concepts innovants pour l'énergie].

Au regard de l'approche résultant des défis sociétaux, la segmentation des axes thématiques se présente de la manière suivante (les deux derniers, transversaux, restent inchangés) :



Cette segmentation présente les enjeux de recherche, tels qu'ils sont définis à travers une approche sociétale en les organisant selon une logique couplant enjeux R&D et enjeux industriels/économiques. Pour ces segments, la stratégie proposée intègre une vision globale allant de la recherche fondamentale à la construction de démonstrateurs. (CF chapitre IV)

Parmi les conditions de réussite, que l'ANCRE propose d'ériger en principes d'action, de cette stratégie figurent les éléments suivants:

- **Focaliser les moyens sur les priorités** définies et mettre en place des **mécanismes de suivi** des feuilles de route choisies et de capitalisation des acquis, en s'appuyant sur des indicateurs objectifs¹²,

¹² La généralisation de l'utilisation d'échelles de maturité technologique faciliterait cette démarche.

- **Développer la transversalité** entre filières (déchet et énergie, par exemple via les biotechnologies, offshore pétrolier/ EMR), ou entre réseaux énergétiques -électricité +gaz+chaleur- ou encore couplages construction /ENR, transport/ENR/efficacité TIC- efficacité énergétique, etc... en tenant compte des besoins et attentes des usagers et autres parties prenantes,
- Développer davantage les **approches systèmes** y compris en intégrant les concepts de villes et mobilité intelligentes, écosystèmes industriels...) **en complément du développement des « briques technologiques »** innovantes ; il y a souvent plus à gagner en optimisant les systèmes que les composants unitaires,
- **Anticiper les besoins des marchés** énergétiques de demain, en France, en Europe et dans le monde, notamment pour les marchés, dynamiques, des pays émergents, dont les besoins sont spécifiques,
- Anticiper un **rôle accru de la modélisation, multi-échelle et pluridisciplinaire, des TIC**, et de « l'intelligence » dans tous les développements liés à l'énergie (en interaction avec Allistène et ATHENA).

Le chapitre 3 ci-dessous présente les outils à mettre en œuvre et le chapitre 4 la synthèse des priorités de recherche à soutenir.

3.3 Quels outils mobiliser pour mettre en œuvre cette stratégie de façon optimale?

Il s'agit de mobiliser des outils adaptés aux objectifs d'excellence d'une part et d'efficacité de la SNR(E) d'autre part en repartant de constats propres au domaine de l'énergie ou de constats plus généraux mais nécessitant une attention particulière dans ce domaine.

3.3.1 Constat : une dynamique de structuration des acteurs nationaux de la recherche publique en énergie à inscrire dans la durée

L'accélération du rythme et l'amplification du rôle de l'innovation au plan mondial, avec la montée en puissance de l'innovation ouverte, et les enjeux du domaine de l'énergie et de la transition énergétique plaident pour une poursuite et une coordination des efforts de structuration des acteurs de la R&D énergétique dans la durée. La construction de la présente SNR(E), sa convergence prévue avec la SNRE, leur déclinaison dans les organismes de recherche et dans les agences de financement, leurs processus de révision dynamique vont assurément dans le bon sens de ce point de vue. En outre, la SNRE apportera un cadre connu et stabilisé, favorable aux collaborations publiques-privées.

Au plan national une structuration a été mise en place pour ce qui concerne les acteurs de la recherche publique au travers de l'ANCRE. La structuration en filières industrielles donne un cadre pour les acteurs industriels. La coordination des pôles de compétitivité ayant une composante significative en matière d'énergie et de ses utilisations (Axelera, Tenerrdis, Cap Energies, Derbi, Systématique, ...) se met en place. Les IEED et Instituts stratégiques en énergie décarbonée (PS2E, INES2, Efficacy, INEF4), une fois effectivement démarrés, créeront ou renforceront des synergies locales ou nationales. La capacité d'innovation des territoires est une ressource sur laquelle il convient de capitaliser en renforçant les échanges entre structures

nationales de pilotage et échelon territorial. Naturellement (cf. infra) certaines de ces initiatives se prolongent au plan européen sans nécessairement qu'une parfaite articulation avec la structuration nationale en résulte même si des progrès en ce sens sont en cours au travers de l'action de l'EERA par exemple.

- **Action 0** : fixer pour une période de 5 ans au minimum, et de préférence 8 à 10 ans, la segmentation thématique de référence, l'ANCRE faisant la proposition de la segmentation présentée ci-dessus, et positionner dans ce cadre systématiquement les actions soutenues par l'Etat. Focaliser les moyens sur les priorités stratégiques relevant de cette segmentation déclinée en partie IV.
- **Action 1** : poursuivre la structuration en visant systématiquement à mobiliser une masse critique de chercheurs, au niveau national, européen voire international selon la nature plus ou moins stratégique des technologies, sans ajouter de strate nouvelle, en visant une cohérence d'action et la mobilisation d'outils complémentaires articulés: réseaux, projets majoritairement bottom-up, projets intégrés (ou défis, majoritairement top-down) et programmes, démonstrateurs.
- **Action 2** : en interaction étroite avec la DGRI et la DGEC, tirer parti et faire évoluer l'organisation récemment adaptée de l'ANCRE pour s'appuyer sur cette dernière dans un rôle de garant de la cohérence des actions de R&D publique en matière d'énergie, et de leur adéquation avec les stratégies industrielles, dans le respect des rôles et des missions de chacun des acteurs concernés.

Dans ce but, il faut prévoir de systématiser la participation de l'ANCRE aux efforts de structuration et s'assurer de l'existence d'une instance de concertation régulière entre les acteurs de la R&D publique, les agences et les industriels à l'instar du rôle joué actuellement sur le seul périmètre de l'ANR, par le Comité scientifique sectoriel (CSS) Energie durable, ou précédemment par les R2IT. Pour la bonne cohérence, il est proposé que cette instance de concertation soit positionnée au niveau de l'ANCRE.

3.3.2 Constat : un déficit de prospective énergétique

De façon générale, la communauté française de recherche tend à sous-utiliser les outils de prospective comparativement à ses homologues des pays concurrents (USA, Allemagne, UK, Corée, ..). Ce faisant, elle se prive d'outils utiles pour faciliter les collaborations entre acteurs du système français de recherche (outil de médiation) ou avec les acteurs étrangers (rapprochement de pratiques).

- **Action 3** : renforcer l'usage des outils de prospective à la fois comme outils de médiation facilitant les collaborations, la structuration et dans le but de disposer systématiquement sur chaque priorité thématique d'agendas stratégiques, régulièrement remis à jour, regroupant les éléments projetés d'avancée des connaissances et les feuilles de route technologiques.

Ces documents de prospective utiliseront utilement le capital de documents existants ou régulièrement produits par les acteurs industriels au travers des filières ou des pôles de compétitivité et les analyses relatives aux évolutions politiques et géostratégiques. Ils ont

vocation à être construits avec ceux-ci et partagés, en particulier, avec les acteurs européens. Outre la contribution en nature des acteurs concernés, cette action pourrait être soutenue financièrement au travers d'une part du Comité de Valorisation technologique de l'ANCRE et d'autre part sur une ambition plus large au travers de financements ANR dédiés.

- **Action 4** : inscrire dans la durée l'action de construction et d'amélioration des scénarios technico-économiques de transition énergétique. Cette action permet d'éclairer globalement les trajectoires possibles et de structurer sur le long terme la SNR(E).

Cette action est un objectif de la priorité *connaissance des marchés et des comportements*. Son soutien serait de même nature que celui exposé pour les outils de prospective ci-dessus, complété d'un effort particulier à mettre en œuvre pour stabiliser et développer un ensemble pertinent de bases de données.

3.3.3 Constat: un rayonnement améliorable de la R&D nationale en matière d'énergie

Un des indicateurs de visibilité des acteurs publics de la R&D sur l'énergie est la participation française dans les JP de l'EERA, les plates-formes technologiques, et les réussites aux programmes FP7 Energie, transports, bio-économie, etc. , JTI, ... Sur le premier indicateur, cette visibilité est bonne puisque tous les JP sont investis. Cependant, la mobilisation des académiques pour l'exercice reste trop faible. En effet, la communauté de recherche scientifique amont nationale ne s'investit pas sur les problématiques de l'énergie à un niveau équivalent à celui des équipes leaders au plan mondial, notamment aux USA où une politique d'incitation continue sur plusieurs années a été mise en place par le DoE mais aussi au sein des grandes universités (Stanford, Berkeley, MIT). Cette politique d'incitation à transposer au domaine de l'énergie les savoirs fondamentaux élaborés sur tout domaine a pris une forte accélération avec la mise en place des Energy Research Frontiers Centers qui ont bénéficié de 800M\$ avec le Recovery Plan de l'administration Obama 1. Ces 46 centres mobilisent environ 4M\$/an sur 5 ans, traitent de sujets variés (thermoélectricité, photonique, catalyse, modélisation –simulation, systèmes bio-inspirés, ...) et sont organisés autour de chercheurs de renom, appliquant leurs connaissances fondamentales au champ de l'énergie.

Dans la mesure où les indicateurs de réussite au FP7 dans le domaine de l'énergie sont améliorables, il résulte de ce constat que quatre niveaux d'action sont souhaitables:

- **Action 5** : mettre en place une action continue pour que les meilleurs chercheurs se mobilisent en dépassant leur discipline pour considérer l'apport de leurs connaissances au domaine de l'énergie.

Cette première action prend place au sein de la priorité *concepts scientifiques innovants pour l'énergie*. Les outils à mobiliser sont, de façon coordonnée, des réseaux d'excellence ouverts et des appels à projets. On notera que l'apport des Très Grandes Infrastructures de Recherche en sciences de la matière ou en biologie notamment, est intégré dans la description de la priorité en partie 4.

- **Action 6** : amplifier l'action au plan européen, au travers d'une plus grande cohérence en termes de thèmes scientifiques entre les stratégies nationales et européennes.

Il s'agit ici d'une part de prolonger l'action de l'EERA, en visant à faciliter l'appropriation de l'outil par les acteurs nationaux, ce qui suppose la mise en place d'une incitation en matière de programmation conjointe (soit parce qu'un relais est pris par H2020, soit au plan national) ou des KIC, et par ailleurs de tirer parti d'une segmentation des priorités établissant clairement le lien avec les priorités européennes.

- **Action 7** : documenter puis mettre en place une stratégie internationale de collaboration.

Le travail d'analyse fait en ce sens dans le cadre du CSS de l'ANR ou de la préparation de la SNRE sont des éléments utiles, de même que le renforcement des liens de l'ANCRE avec ses homologues européennes et la montée en puissance de l'EERA. Les travaux menés dans le cadre du cinquantenaire du traité de l'Elysée pour dynamiser les collaborations franco –allemandes dans les domaines des réseaux et du traitement des déchets nucléaires notamment doivent naturellement faire partie de cette stratégie. Le nouveau Groupe International de l'ANCRE, pourrait utilement contribuer à cette stratégie sur ses deux volets anticipés: l'amélioration du rayonnement et de l'attractivité de la recherche nationale, l'appui à l'export de nos industriels, notamment la capacité d'ingénierie énergétique française, et y compris sur des technologies qui ne seront pas immédiatement développées pour un déploiement national (architectures réseaux, solaire à concentration, mobilité urbaine, etc.).

On notera que cette stratégie devra prendre en compte et différencier les technologies stratégiques dont la France doit garder la maîtrise, et des technologies à développer en coopération internationale (européenne en particulier), et des technologies non stratégiques disponibles sur le marché

- **Action 8** : tirer parti de la logique de site en cours de concrétisation et y intégrer des campus de démonstration de solution innovante en matière énergétique.

A l'instar d'initiatives phares telle que celle du MIT ou de l'université de Delft par exemple, il s'agit de profiter des efforts de mise en place de campus modernes au plan national (exemple du projet EPPS Saclay, campus Giant) pour y intégrer une dimension de démonstration de concepts en rupture mobilisant les acteurs (enseignants -chercheurs, étudiants, industriels, collectivités, ..) et en s'appuyant sur les pôles de compétitivité.

3.3.4 Constat: un rôle de la R&D à amplifier dans la promotion des intérêts industriels et économiques français en lien étroit avec les filières stratégiques existantes ou en devenir

Trois dimensions au moins appellent la mise en place d'une action vigoureuse favorisant le couplage des actions de R&D publiques et privées:

- la conclusion posée par les analyses des scénarios énergétiques montre que l'innovation est une clé indispensable de l'atteinte de l'objectif facteur 4 et plus généralement de la réussite de la transition énergétique. L'innovation est également une condition nécessaire au maintien de la compétitivité et au développement des secteurs industriels énergétiques plus matures, aujourd'hui très performants (nucléaire, hydrocarbures, etc.), notamment sur les marchés à l'export,

- la nécessité de transformer la transition énergétique en opportunité économique, non seulement pour les grands groupes industriels et les ETI mais aussi par la création de jeunes entreprises innovantes, en faisant un diagnostic clair des forces et faiblesses du positionnement français (recherche, industrie) et des domaines à investir, sur la base des atouts nationaux,
- la nécessité pour les acteurs industriels d'améliorer leur compétitivité hors -coût.

Bien que les liens entre les acteurs industriels de l'énergie et les acteurs publics soient proportionnellement plus développés que dans d'autres secteurs économiques, les constats sur la difficulté du système français de recherche en matière d'appui à l'innovation et de transfert s'appliquent globalement. Les analyses et actions proposées dans ce document ont vocation à compléter ou illustrer les initiatives globales, notamment en support au développement des technologies clés génériques (KETs) qui seront mises en œuvre en réponse au défi ***"stimuler le renouvellement industriel"***.

La situation est, par ailleurs, très contrastée selon les domaines de l'énergie. A titre d'exemple, alors que les acteurs des secteurs historiquement forts du nucléaire, des hydrocarbures et des ressources du sous-sol bénéficient de l'existence d'EPIC dédiés facilitant un couplage efficace avec l'industrie, qui a fait ses preuves et qu'il convient de préserver voire d'amplifier sur leurs nouveaux territoires de croissance, que ceux des réseaux, du stockage et de la conversion de l'énergie parviennent assez bien à transférer leurs compétences vers le milieu industriel, un domaine comme les matériaux avancés pour l'isolation des bâtiments reste largement entre les mains des entreprises phares du BTP sans un couplage d'ampleur avec les acteurs publics. Le niveau exact de couplage par domaine est l'objet d'une analyse détaillée dans la partie 4 : il conviendra donc d'adapter les actions proposées ci-après en fonction des domaines.

D'une manière générale, l'augmentation de la complexité des technologies conduit inexorablement vers une montée en intensité financière des activités de recherche qui entraîne une inévitable concentration des moyens sur un nombre limité de sites. On assiste de ce fait, au plan mondial, en particulier aux Etats-Unis, au Japon, en Chine, en Inde, à la création de **Centres d'intégration des technologies** qui concentrent moyens et compétences pour atteindre masse critique et stature internationale. Ces Centres d'intégration ont vocation à devenir des acteurs de premier plan au niveau international et à se fédérer, sous forme d'alliances, avec leurs homologues européens. En France, l'émergence à Chambéry de l'Institut national de l'énergie solaire, centre d'intégration des technologies solaires, a clairement montré la voie. Les IEEDs et autres Instituts stratégiques sur l'énergie décarbonée poursuivent cette logique.

D'autres actions de structuration de l'interface industrie-recherche publique comme l'inscription dans la durée des instituts Carnot ou le renouvellement en 2012 des pôles de compétitivité, ou encore la mise en place de groupes de travail R&D au sein de certains comités de filières industrielles sont également à souligner comme allant dans le bon sens et devant être poursuivies.

Des efforts restent cependant à faire afin de rapprocher les différents acteurs et cultures (académiques, EPIC, industriels, ...) autour d'objectifs communs. Outre la poursuite du soutien aux centres d'intégration technologique cités plus haut, la pérennisation d'un cadre stable proposée comme **Action 0** et la mise en place d'actions communes de prospective (**Actions**

3&4), les actions suivantes apparaissent nécessaires pour faciliter l'interfaçage entre acteurs publics de recherche et industriels et un transfert efficace.

- **Action 9** : mobiliser des masses critiques et coordonnées de chercheurs sur chaque thématique prioritaire.

Dans certains cas ces masses critiques coordonnées existent (nucléaire, hydrocarbures, solaire, batteries ... par exemple), dans d'autres, les IEED vont contribuer à les constituer. Mais les outils n'existent pas toujours pour pérenniser les communautés de recherche et améliorer leur productivité vis-à-vis d'objectifs définis. Il est proposé de renforcer la mise en œuvre opérationnelle de réseaux en s'inspirant à la fois de l'expérience du RS2E, des R2IT et des expériences des réseaux d'excellence européens. Ces réseaux positionnés sur des TRL 1-4 devront être thématiques, multidisciplinaires et avoir une vision pré-programmatique, en mobilisant tout le spectre de la recherche, de sorte qu'une osmose entre recherche fondamentale et finalisée se réalise. En particulier, ils auront vocation à faire émerger des projets exploratoires allant jusqu'à une preuve de concept (approche bottom-up), voire la création de start-ups, ou à répondre à des commandes de recherche s'intégrant dans les objectifs finalisés, destinés par exemple à accompagner les révolutions technologiques (approche top-down). Il sera donc nécessaire de favoriser les collaborations étroites, gagnantes-gagnantes, entre EPIC, recherche académique et R&D privée/industrielle.

La productivité des réseaux suppose trois conditions : un management professionnel et dédié, une couverture large des TRL impliquant un effacement des frontières entre recherche fondamentale et finalisée, enfin, un accompagnement à la mise en œuvre des projets dans la durée (ingénierie financière, valorisation, évaluation de l'impact).

En complément, des projets intégrés sont à prévoir pour permettre de lever rapidement un verrou si nécessaire. L'ANR ou l'ADEME pourrait apporter une validation extérieure aux projets intégrés et réseaux, et les soutenir financièrement. Ces réseaux et projets intégrés pourraient être suscités ou portés par un groupe programmatique de l'ANCRE complété d'acteurs industriels. Un exemple de domaine qui bénéficierait d'une telle action est celui des ressources en métaux stratégiques ou encore celui de la récupération et de la valorisation de chaleur fatale.

NB : Dans les deux cas « réseaux » et « projets intégrés », si le terme retenu est celui utilisé par la Commission européenne, les auteurs de ce document insistent pour que la lourdeur administrative associée à ces outils au plan européen soit épargnée aux acteurs qui les mettront en place en France.

- **Action 10** : mettre en place une structuration systématique des filières intégrant un groupe de travail recherche et incluant une représentation de l'ANCRE afin de renforcer la coordination des efforts mis en œuvre pour lever les verrous technologiques et économiques sur la base de feuilles de route technologiques; s'organiser systématiquement au plan national en miroir de la structuration européenne lorsque celle-ci existe (JTI, association sur le stockage de l'énergie,...).

La mise en place au plan européen de JTI ou plus récemment de PPP, organisés avec un groupe d'industriels et une association des acteurs de recherche permet des interactions constructives entre acteurs. Le bénéfice d'une organisation miroir -alignée au plan national- sera d'une part de faciliter les interactions public- privé et d'autre part d'améliorer les résultats au plan européen.

L'exemple de la JTI « Hydrogen and Fuel Cells » appuyée sur le *research grouping* N-Hergy et au plan national sur l'AFHYPAC illustre très clairement le gain qui peut être attendu d'un tel montage. Des filières à structurer rapidement portent sur le stockage de l'énergie, ou sur les matériaux stratégiques par exemple.

- **Action 11** : amplifier et coordonner les actions territoriales sur les démonstrateurs en sollicitant en particulier le retour d'expérience.

Dans une problématique comme l'énergie, les démonstrateurs pré-industriels jouent un rôle clé pour valider les options technologiques retenues et évaluer le coût associé. Une action volontariste sur les démonstrateurs a été confiée au PIA et en particulier à l'ADEME. Il est indispensable de renforcer ces actions et d'amplifier la dimension « territoires de démonstration » : d'une part en impliquant clairement les régions dans le cofinancement, dans une vision de complémentarité des territoires (non duplication), d'autre part en travaillant le retour d'expérience sur la connaissance acquise y compris sur les comportements et modes d'organisation, dans la limite de la confidentialité exigée par les industriels engagés sur ces démonstrateurs. La démonstration soulève en effet de nouvelles conditions d'opération, qui peuvent confirmer ou infirmer les hypothèses prises par les feuilles de route technologiques, une partie de cette information pourrait être utilement partagée, par exemple au sein de l'ANCRE. A titre d'exemple, une démonstration de mobilité hydrogène pourrait être articulée sur différents territoires afin de limiter l'effort d'investissement en infrastructure. Le retour d'expérience sur le comportement de divers véhicules, sur les différentes technologies de production locale et décarbonée d'hydrogène, en lien avec les problématiques de sécurité et de réglementation, amènerait un gain de temps précieux à d'autres initiatives ultérieures ainsi qu'à la stratégie de recherche nationale.

- **Action 12** : étendre le déploiement de lignes pilotes à la production de composants du système énergétique en cohérence avec la démarche soutenue par la Commission européenne.

Cette étape ne peut s'effectuer que dans un environnement industriel déjà compétitif : soit dans des lignes pilotes distinctes de l'outil actuel existant, opérées par des industriels pionniers, soit (c'est le cas de la nanoélectronique, mais aussi de la chimie) dans des lignes pilotes dites 'embedded' pour marquer leur immersion dans les outils de production existants, également opérées par des industriels pionniers, soit encore dans des lignes pilotes intégrées à des centres de recherche technologiques et largement ouvertes aux entreprises, dont des start-ups qui n'auraient pas les moyens financiers de construire de tels premiers outils de production.

- **Action 13** : favoriser la création massive de start-ups par les jeunes diplômés et les chercheurs en encourageant la prise de risque –et sa mesure- et en développant les mesures d'accompagnement financier et institutionnel des start-ups du premier au troisième tour de table leur permettant notamment de se positionner sur les marchés prometteurs.

Dans ces lignes pilotes, les filières technologiques innovantes sont combinées, et portées à un niveau de maturité TRL 8 c'est-à-dire un système complet qualifié et reproductible. Les premiers produits prototypes sont alors fabriqués, testés pour être évalués directement par les clients

pour un retour d'expérience rapide. L'outil à mobiliser pour cela pourrait être inspiré de l'approche utilisée dans le programme PIA nanoélectronique.

3.3.5 Constat: un besoin de formations spécialisées en énergie

L'un des objectifs de la SNR(E) est de permettre à l'économie française de tirer le meilleur parti, grâce aux efforts de R&D, de la transition énergétique à travers la création et/ou le renforcement de filières nationales. En outre, certains secteurs doivent faire face à un renouvellement de leurs effectifs, de leurs métiers et des compétences requises. Il est à noter que les gisements d'emplois correspondants à niveaux de compétence variés - qu'il s'agisse du renforcement des filières industrielles ou des activités liées au déploiement des produits et services sur le territoire national - sont évalués à plusieurs centaines de milliers qui pour une part correspondront à des transformations d'emplois. L'enjeu, pour la France est de veiller à la cohérence entre le rythme de maturation des technologies, le déploiement de filières industrielles - et les reconversions nécessaires - et les objectifs de politique énergétique. Cela suppose que les compétences requises soient disponibles pour les entreprises au moment requis.

Par ailleurs, en matière de R&D dans le domaine de l'énergie, les préconisations de cette SNR(E) invitent à une réflexion sur les compétences nécessaires et, notamment à un renforcement du développement de certaines aptitudes (fonctionnement en réseau, interdisciplinarité, dynamique interculturelle, ouverture sur la réalité du secteur concurrentiel/marchand, ouverture sur l'international) et connaissances (électronique de puissance, matériaux en conditions extrêmes, ...). Enfin, la diffusion du progrès technologique sera plus soutenue si l'esprit entrepreneurial des chercheurs est renforcé et valorisé.

- **Action 14 :** veiller à la cohérence des calendriers en identifiant les besoins en compétences nécessaires à 5 ans et ce, pour la totalité du spectre (technicien, ingénieur, chercheur) nécessaires, à renforcer ou à développer compte tenu de l'existant,

Au regard des délais requis en matière de formation, l'évaluation des besoins devrait être conduite dans les meilleurs délais, notamment en s'appuyant sur les initiatives européennes en la matière (Energy training Initiative).

- **Action 15 :** mettre en place (ou développer) les outils et structures de formation diplômante et continue notamment pour faire face aux reconversions indispensables, y compris le développement de la formation par la recherche en favorisant le doctorat, nécessaires et s'assurer de l'attractivité des formations et carrières en tenant compte de la diversité des profils requis ;

Ce travail doit associer les industriels qui seront in fine amenés à intégrer les implications en termes de formation professionnelle, d'apprentissage et de stages.

Une attention particulière devra être portée aux questions de propriété intellectuelle et de normalisation par exemple par une inscription obligatoire au programme de dernière année de toute formation diplômante.

4. Priorités thématiques proposées

Chacune des priorités ci-dessous 4.1, 4.2, 4.3 devra être abordée par une combinaison coordonnée et pensée dans la durée, d'approches top-down et bottom-up.

4.1 Priorité 1: Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique

4.1.1 Priorité 1.1 : Stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs

Le stockage de l'énergie et l'inter-conversion entre vecteurs (hydrogène, gaz hydrocarbonés, électricité, chaleur) seront des enjeux technologiques clef pour la réussite de la transition énergétique. Le déploiement massif des énergies renouvelables nécessitera une optimisation de l'accommodation de l'offre à la demande énergétique (quelle que soit sa nature), tout en garantissant la fourniture fiable et à un prix compétitif d'une énergie la moins carbonée possible. Ainsi, le déploiement de moyens de stockage plus ou moins massifs, distribués ou concentrés, de technologies d'inter-conversion et d'interopérabilité entre vecteurs sera amené à jouer un rôle majeur dans la gestion et l'organisation des réseaux énergétiques interconnectés ou non.

Pour répondre à cet enjeu, il est nécessaire de considérer les différentes problématiques suivantes et d'accélérer la mise en place coordonnée d'un ensemble de démonstrateurs territoriaux:

- Systèmes de stockages réversibles
- Systèmes de stockage "Power-to-Gas"
- Gestion de l'inter-conversion et de l'interopérabilité entre réseaux d'énergie (électricité, différents gaz, chaleur, ...)
- Développement de piles à combustible, électrolyseurs, systèmes réversibles
- Mise en place des infrastructures indispensables au développement de la filière hydrogène ; mise en place d'installations de production, distribution, stockage, consommation de l'hydrogène à usages multiples (industriel, mobilité, résidentiel ou tertiaire), notamment dans des zones à forte densité de population.
- Micro-réseaux multi vecteurs incluant autoconsommation (éco-quartier, territoire),
- Sécurité et cyber-sécurité des réseaux

Les principaux acteurs industriels français sont :

- Dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible : AREVA, Air-Liquide, ALPHEA Hydrogène, Arkema, Ineos, McPhy, Solvay, auxquels s'ajoutent des entreprises sous-traitantes pour le développement des composants et des sociétés d'ingénierie ;
- Dans le secteur de l'énergie : EON France, EDF, GDF-SUEZ, ERDF, GRDF, Veolia (Dalkia), Total et Lafarge, comme énérgo-intensif ;
- Dans le stockage: Air Liquide, McPhy, SAFT, Batscap, Saint-Gobain.

La recherche publique (piles à combustible, génie des procédés, électrochimie, gestion des systèmes complexes) relève essentiellement du CEA, d'IFPEN, d'universités et du CNRS.

4.1.2 Priorité 1.2 : Efficacité énergétique des usages bâtiment, Green IT, transport et industries

Les enjeux sont d'accélérer la transition énergétique vers la sobriété et l'efficacité énergétiques, de réduire les factures énergétiques et de permettre aux entreprises françaises des secteurs concernés (automobile, bâtiment, bureaux d'étude et d'ingénierie) de proposer et/ou utiliser des produits innovants (compétitivité, qualité) favorisant les économies d'énergie.

- Dans le domaine du **bâtiment et de son insertion dans la ville**, une accélération de l'effort de mise à disposition de solutions technologiques innovantes est nécessaire dans les domaines suivants :
 - efficacité énergétique des matériaux pour la construction et la rénovation, avec trois volets, mise au point et élaboration des matériaux, mise au point de procédés innovants de mise en œuvre, optimisation système.
 - développement d'une plate-forme logicielle de maquette numérique intégrée du bâtiment jusqu'au territoire, intégrant les volets industriels et agricoles permettant d'optimiser les flux énergétiques afin de minimiser la consommation énergétique globale en tenant compte par ailleurs des objectifs de confort et de sécurité. Cet objectif comporte une forte contribution numérique et présente un fort potentiel de rupture.

La filière industrielle du bâtiment compte plus de 300 000 entreprises de toutes tailles – grands groupes, PME, TPE – employant environ 1,3 millions de personnes. Elle constitue donc une des filières majeures de l'économie française. Le tissu industriel est composé aussi bien de grands groupes internationaux (Bouygues, Vinci, Eiffage, Lafarge, Saint-Gobain) menant des projets complexes que d'entreprises locales assurant un service précis. Le tissu de ces entreprises est, en l'occurrence, très dense sur l'ensemble du territoire français afin de répondre à la variété des demandes de services.

La France dispose d'une force industrielle de niveau international dans la construction (Bouygues et Vinci), la fabrication de matériaux et d'équipements performants (Saint-Gobain pour les matériaux d'isolation et le verre, Lafarge et Vicat sur les matériaux de construction, De Dietrich et CIAT sur les équipements de chauffage, ou Schneider Electric et Legrand sur les équipements électriques), les services de gestion de la performance énergétique avec Dalkia, Cofely ou encore Idex, les bureaux d'études et sociétés d'ingénierie (plus de 7 000 sociétés françaises sont spécialisées dans les études techniques et l'ingénierie dans le secteur du bâtiment), les filières des matériaux de construction (béton, acier, bois).

En matière de maquette numérique, les acteurs nationaux du logiciel dont Dassault Système sont à prendre en compte en complément.

En matière de recherche, le CSTB et les Centres Techniques Industriels (CETIAT, CTBA, Costic,...), l'IFSTTAR, des équipes universitaires, des écoles d'architecture, du CNRS, de laboratoires mixtes, de l'école des Mines de Paris, de l'INES et du CEA s'impliquent dans les travaux de recherche de la filière.

- Dans le domaine **de l'efficacité énergétique des technologies de l'information et de la communication (« Green IT »)**¹³, les enjeux se situent à deux niveaux :
 - permettre, grâce à ces technologies, d'accroître l'efficacité énergétique dans des secteurs aussi divers que la production d'énergie, les réseaux d'énergie, le bâtiment et le transport, par leur intégration dans tous les domaines où elles peuvent contribuer à optimiser l'utilisation de l'énergie (transport - électronique embarquée, gestion de flotte... -, bâtiment - domotique, gestion de l'éclairage... -, industrie - consommation des machines tournantes...-), voire conduire à limiter certains usages (par exemple évitement de transports par recours aux visio-conférences...), développement de l'économie électronique (dématérialisation), aide des utilisateurs à maîtriser leurs consommations;
 - réduire la consommation des systèmes électroniques (smartphone, ordinateurs, applications domestiques et domotiques...) et notamment des data centers, à la fois par une approche d'optimisation énergétique globale, l'optimisation énergétique des composants de sécurité d'approvisionnement (batteries, UPS,...), le développement de composants électroniques et d'électronique de puissance basse consommation.

Les marchés concernés sont en plein essor compte tenu du développement de ces technologies et de son impact sur la demande d'énergie. Les projections montrent qu'en 2020, ce secteur représentera 10% de la consommation énergétique européenne versus 3% aujourd'hui.

Les verrous à lever sont en particulier :

- La réalisation de composants matériels de volume réduit, de faible consommation et fiables : communications RF, Computing, Processeur OS, COTS,
- La maîtrise de la thermique des μ -composants jusqu'aux baies électroniques des centres de calcul,
- La conception d'architectures adaptatives pour minimiser la consommation d'énergie,
- Le développement de structures de calcul parallèle et d'architectures distribuées basse consommation pour le cloud (architecture HW multicore), et le calcul haute performance,
- L'amélioration de l'efficacité énergétique des protocoles de communications,
- La gestion électrique et thermique (chaud/froid) optimisée des bâtiments abritant data-center et HPC.

Les acteurs industriels nationaux concernés sont, d'une part ceux développant les composants de base des TICs, ou les équipementiers : ST Microelectronics, Alcatel Lucent (composants), Orange (télécommunications), Bull (centres de données massives, centres de calcul), d'autre part les acteurs développant des équipements de faible consommation pour différents domaines d'applications : Schneider (équipements intelligents pour la gestion de l'énergie), Renault (gestion de l'énergie embarquée), Airbus (aéronautique), EADS, Thales (capteurs pour la sécurité), et enfin les acteurs de la gestion et de l'optimisation thermique des systèmes et des bâtiments (Dalkia, GDF-SUEZ, ...).

¹³ Un document commun ANCRE-Allistène développe le rôle des TIC dans la maîtrise de la demande d'énergie et les axes de R&D à soutenir dans le cadre de cette SNR(E).

Plusieurs établissements académiques disposent de compétences dans ces domaines et ont déjà engagé des programmes de R&D, donc sont capables de se mobiliser efficacement pour répondre aux défis à relever : le CEA, Mines Paris Tech, l'Institut Telecom, Supelec, l'INRIA, le CNRS.

Dans le domaine du **transport**, la priorité est donnée dans ce document aux véhicules de transport routier, les autres secteurs faisant déjà l'objet d'études par d'autres structures comme le Corac pour l'aviation ou le Grenelle de la mer pour le transport maritime et fluvial. La question de l'organisation des transports en lien avec l'aménagement du territoire, notamment urbain, doit être traitée mais la faiblesse relative de la dimension technologique spécifiquement liée à l'énergie a conduit l'ANCRE à ne pas s'en saisir dans le cadre de ce travail. La contribution commune ANCRE-Allistène aborde toutefois cette question sous l'angle de l'apport des TIC à la maîtrise de l'énergie dans les transports, y compris à travers l'optimisation des flux et trajets.

- l'objectif structurant du programme proposé est le **développement de véhicules particuliers consommant 2l/100 km ou 10 kWh/100km** à travers une approche holistique et des efforts de R&D prioritairement focalisés sur le développement de groupes motopropulseurs à très haut rendement énergétique et faibles émissions de polluants, l'utilisation de carburants alternatifs au pétrole (dont les biocarburants de 2^{ème} et 3^{ème} générations), les batteries et infrastructures de rechargement, les piles à combustible et le stockage à bord de l'hydrogène, les systèmes de dépollution, l'électronique de puissance basse consommation et les motorisations électriques à haut rendement, la réduction de la masse des véhicules par développement de solution de sécurité active, et la gestion énergétique optimisée et adaptative avec l'environnement (véhicules communicants).

Le secteur industriel concerné comprend les grands constructeurs (Peugeot, Renault), les équipementiers (Valeo, Faurecia, Continental, Michelin, Plastic Omnium...), de nouveaux acteurs (Bolloré) et plus de 750 PME-PMI sous-traitantes ou investissant des marchés encore de niche (MIA).

A côté d'équipes universitaires, le CEA, le CNRS, l'IFPEN et l'IFSTTAR sont les principales structures de recherche publique.

- Dans le domaine de **l'industrie**, qui représentait, en 2011, 21% de la consommation finale d'énergie en France et près d'un quart des émissions de CO₂. Le principal enjeu est d'une part d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés et, d'autre part, rechercher une approche intégratrice de l'énergie au niveau de l'usine comme en lien avec son environnement immédiat (site industriel, autres entreprises, éco-parcs, bassin urbain) qui doit favoriser le développement d'une économie circulaire et l'optimisation énergétique.

Les industriels plus particulièrement concernés sont : Total , Air Liquide, GDF-SUEZ, EDF, Alstom, Areva, Vinci, Bouygues, Fives cryogénie, Enertime, Corys, EREIE, Fluidyn, Bertin, CNIM, Arkema, Rhodia, Suez Environnement, Technip, ...

Les principales structures de recherche publiques sont, Mines –Paris Tech, Centrale, Supelec, CEA, IFPEN, CNRS, Université de Lyon, Université Paris 11, IFTH, CTP.

L'institut de recherche et de formation PS2E, Paris – Saclay Efficacité Énergétique jouera un rôle structurant, fédérateur dans la recherche public privé dans la flexibilité et l'efficacité énergétique des installations industrielles couplées au bassin urbain.

4.1.3 Priorité 1.3 : Développement des filières ENR

Quatre filières appellent une attention particulière:

- Dans le domaine de **l'énergie solaire**, la compétition internationale est intense et a abouti à une réduction importante des coûts. Les progrès technologiques (réduction des quantités de matière, augmentation des rendements, optimisation des systèmes, ACV, durabilité des installations) sont, dans ce cadre, déterminants afin de permettre aux industriels français de lever les verrous correspondants et de proposer des produits compétitifs sur l'ensemble de la chaîne de valeur (de la cellule au système de production) en jouant sur les synergies potentielles. La France possède une R&D du meilleur niveau et doit mettre en place des politiques – y compris dans un cadre européen unifié- permettant aux industriels d'investir sur cette filière avec une vision moyen-long terme stabilisée dans le photovoltaïque, dans le solaire thermique et dans le solaire thermodynamique, cette dernière technologie offrant de prometteuses perspectives à l'export.

Les principales approches à soutenir sont :

- dans le domaine de la production d'électricité photovoltaïque, la purification et la cristallisation du silicium, l'augmentation des rendements de conversion, la concentration du rayonnement et les couches minces, en particulier celles basées sur les matériaux semi-conducteurs composés ;
- la filière thermodynamique est appelée à se développer à condition d'optimiser toutes les étapes de la chaîne de production : système de concentration, récepteur solaire, stockage, appoint et conversion ; en outre, le développement de la flexibilité d'utilisation de la chaleur captée (temporisation de la production d'électricité) constitue un enjeu important ;
- la production de chaleur par conversion thermique, essentiellement utilisée pour des applications à basse température dans le bâtiment (eau chaude, chauffage), doit quant à elle progresser en matière de capteurs, de stockage, de contrôle-commande des installations et d'intégration au bâtiment ;
- le développement d'outils de modélisation numérique pour l'évaluation et la prédiction de la ressource et de solutions de stockage de l'énergie.

Les industriels concernés au plan national sont: EDF-EN, AREVA, Alstom, Schneider, Saint-Gobain, Total, CNIM, SolarEuromed, Alsolen, ECM, Semco, Air liquide, Mersen, Vesuvius, Urbasolar, Solaire Directe, Photowatt (EDF), Giordano, Clipsol), Viessman, Vaillant, Frisquet...Trois pôles de compétitivité fédèrent un grand nombre d'entreprises de ce secteur : Tenerrdis, Cap Energie et Derbi. Le Syndicat des Energies Renouvelable (SER) fédère 330 entreprises du solaire.

L'outil de recherche publique français est articulé autour de trois pôles complémentaires qui mobilisent environ 500 chercheurs du CEA, du CNRS et de plusieurs universités ou écoles :

- PROMES, recherche amont et technologique sur le solaire thermique et le solaire concentré,
- I-PVF, solaire photovoltaïque avancé,
- INES, centre d'intégration technologique sur l'ensemble des technologies solaires.

- Dans le domaine des **bioénergies**, le développement des procédés à haute température qui permettent notamment de produire des biocarburants de seconde génération ou de l'hydrogène, nécessite de lever certains verrous liés à la gestion des composés inorganiques et autres polluants, à la variabilité des propriétés de la biomasse entrante qui nécessite un prétraitement spécifique, et à l'intégration et l'optimisation énergétique de l'ensemble des procédés. Par ailleurs, les procédés biotechnologiques sont également très prometteurs, avec des verrous, à ce stade, liés à la complexité de la déconstruction de la biomasse ligno-cellulosique, à la sélection, au développement et à la maîtrise du coût de production des micro-organismes et/ou enzymes ainsi qu'à l'intégration de l'ensemble des procédés. Les mêmes défis de productivité et de sélectivité sont posés pour la production de produits chimiques bio-sourcés à partir de la biomasse. A plus long terme, la recherche concerne aussi l'utilisation de micro-algues et autres micro-organismes, non concurrents avec la production alimentaire, pour produire des éléments liquides (lipides ou bio-crudes) ou gazeux (hydrogène, méthane) à vocation énergétique (biocarburants de 3ème génération). L'un des enjeux importants est de développer, pour le moyen-long terme, une offre de biocarburants de 2ème et 3ème génération répondant aux besoins du transport aérien. Enfin une analyse des ressources disponibles et durables en biomasse est à mener notamment en termes de surface et de ressources en eau disponibles (plate-forme collaborative bio-osmose). Cette analyse pourrait être partie intégrante de l'élaboration d'une feuille de route nationale dans le domaine de la bio-économie, favorisant les approches systémiques (approvisionnement et concurrence entre usages de la biomasse, modes de consommations, synergies entre les territoires, synergies entre systèmes de production agricole et forestier, etc.).

Les acteurs industriels sont: Total, GDF-SUEZ, Sofiproteol, Unigrain, Teréos, Lessafre, Axens, Air Liquide, Véolia, AREVA et de nombreuses PME-ETI. Les pôles de compétitivité sont Axelera, Tenerrdis, Cap Energies.

Les acteurs de la recherche publique sont: IFPEN, INRA, CNRS, CEA, plusieurs universités, Ifremer, CIRAD, IRSTEA.

- Le Grenelle de la Mer a impulsé une dynamique visant à porter en 2020 la contribution des **énergies marines renouvelables** dans le bouquet énergétique national à 6 GW (en termes de puissance installée) dont 80% d'éolien offshore, une dynamique, confortée à maintes reprises depuis par l'Etat et qui s'observe également sur le plan européen et international. Il existe en effet un fort potentiel dans les espaces maritimes sous souveraineté française (11 Mkm2 en métropole et outre-mer) et la France dispose, par ailleurs, d'acteurs scientifiques et industriels de tout premier rang dans le domaine énergétique et maritime.

De nombreuses voies technologiques sont concernées :

- Énergie hydrolienne, proche d'un développement industriel, justifiant l'installation rapide de fermes-pilotes expérimentales dans les zones côtières les plus prometteuses
- Énergies éolienne offshore flottant, qui fait l'objet de technologies prometteuses pour les eaux côtières profondes (au-delà de 40 m), justifiant également l'installation de fermes-pilotes expérimentales
- Énergie houlomotrice, ou de nombreuses technologies concurrentes sont en cours de test

- Énergie thermique des mers pour les eaux tropicales qui entre aujourd'hui dans une phase d'expérimentation
- Énergie osmotique, non mature et nécessitant un effort important de R&D
- Énergie marémotrice, dont le développement, malgré un fort potentiel, reste freiné par ses impacts environnementaux.

Les principaux thèmes à considérer sont les suivants :

- Évaluation et prédiction de la ressource (outil de modélisation numérique spécifique "de la machine au parc"),
- Solutions innovantes de raccordement entre câble de transport de l'électricité vers le rivage et poste de conversion HT alimenté par les générateurs électriques
- Réduction drastique des coûts pour l'ensemble des technologies concernées. En particulier :
 - Pour l'éolien offshore flottant, efforts à focaliser sur la réduction du coût des flotteurs et sur la mise en œuvre de nouveaux concepts innovants flotteur/aérogénérateur technologiquement optimisé,
 - Pour l'énergie thermique des mers, efforts à porter sur la performance des échangeurs de chaleur à long terme et sur la conception des conduites de confinement de l'eau froide.
- Solutions de maintenance optimisée (augmentation des durées de vie)
- Tests sur démonstrateurs (et retour d'expérience) pour valider les concepts proposés et retenir les plus performants par rapport aux besoins
- Mise en place de fermes pilotes expérimentales (et retour d'expérience)
- Analyse relevant des SHS concernant l'acceptabilité sociale, la résolution des conflits d'usage, etc.

La France compte de nombreux acteurs industriels (historiquement très souvent impliqués dans le domaine de l'offshore pétrolier) : DCNS, ERDF, EDF, Alstom, STX, SBM, Total, Technip, Areva, etc. mais aussi de très nombreuses PME-PMI (Principia Mauric, Sofresid, Freyssinet, Sirehna, Acric, Oceanide, hydrOcean, Actimar, etc.).

Il convient de poursuivre le renforcement de l'organisation et de la structuration de la filière, en favorisant les recherches collaboratives et la mutualisation des études technico-économiques, avec la participation active de France Énergie Marine et des principaux organismes de recherches concernées : Ifremer, CNRS, IFPEN, CEA, École centrale Nantes, École centrale Marseille, ENSIETA ou encore Météo France.

- Dans le domaine de **la géothermie**, énergie renouvelable non intermittente, il existe un potentiel très important, à mettre en regard d'une faible occupation foncière. Source d'énergie locale, la géothermie est un facteur de compétitivité des territoires. Une de ses particularités (par rapport aux autres énergies renouvelables notamment) est de présenter un risque géologique conséquent, qui demande d'investir dans la réalisation de forages à un stade où le risque de ne pas trouver la ressource géothermique reste élevé. La limitation de ce risque est un enjeu qui appelle des réponses tant techniques (exploration) que financières.

Les différentes formes de géothermie (électricité géothermique, réseaux de chaleur, chaleur et rafraîchissement pour le bâtiment individuel, collectif ou tertiaire) connaissent un

développement accéléré ces dernières années, en raison de ses multiples atouts et des politiques favorables aux énergies renouvelables.

Néanmoins, différents progrès restent à accomplir pour réussir ce développement massif de l'exploitation de l'énergie géothermique. Il s'agit principalement d'améliorer les coûts et de diminuer les risques des projets, y compris de manière indirecte, en jouant sur des critères de puissance ou de durée de vie.

Les principales approches à soutenir sont :

- Pour la géothermie profonde : évaluation de divers types de ressources, technologies de forage et de stimulation, architecture et techniques d'exploitation, maintenance et monitoring, valorisation des effluents, optimisation énergétique, impact environnemental ;
- Pour la géothermie superficielle : caractérisation des phénomènes thermiques se produisant dans les échangeurs géothermiques et dans le proche sous-sol, couplage avec les phénomènes hydriques, chimiques ou bactériologiques, conséquences en matière d'exploitation (performance des échangeurs, aptitude au stockage inter saisonnier) et d'impact environnemental.

Les industriels concernés au plan national sont:

- Pour la géothermie basse et haute énergie : CFG Services, ES Géothermie, GPC Instrumentation Process, COFOR, Schlumberger, Cryostar, Alstom, NSC Environnement, De Hatten, EDF, Dalkia, Cofely, Fonroche, Electerre de France ;
- Pour la géothermie très basse énergie – pompes à chaleur : foreurs, grandes entreprises généralistes du chauffage et spécialistes du chauffage électrique, entreprises spécialisées dans la production et l'installation de systèmes de PAC.

L'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG), le Syndicat des Foreurs d'Eau et de Géothermie (SFEG), ainsi que plusieurs pôles de compétitivité (AVENIA, CAPENERGIE, DREAM, RISQUES, S2E2) fédèrent un grand nombre d'entreprises de ce secteur.

Les principaux acteurs de la recherche publique français sont : BRGM, CSTB, IPG Paris, Université de Strasbourg, CNRS.

4.2 Priorité 2: Jouer des atouts compétitifs des filières énergétiques actuellement majoritaires dans le bouquet national et veiller à la sécurité d'approvisionnement des ressources stratégiques

4.2.1 Priorité 2.1 : Optimisation des ressources énergétiques et minérales stratégiques

L'exploitation des ressources énergétiques en France est un facteur de compétitivité industrielle et de création d'emplois, et permettrait d'alléger les importations (et donc la balance commerciale) sans remettre en cause les objectifs de décarbonisation du bouquet énergétique national. De même, les ressources minérales jouent un rôle déterminant dans l'économie mondiale et sont indispensables au développement des technologies vertes. La connaissance du sous-sol, des facteurs de risque pesant sur leurs chaînes d'approvisionnement (intelligence minérale) et la valorisation de ces ressources stratégiques constituent donc un enjeu clé pour la production d'énergie.

L'ANCRE propose ici :

- d'une part de faire un inventaire complet des ressources stratégiques nationales - hydrocarbures non conventionnels, hydrogène naturel, géothermie (notamment profonde) et ressources minérales non énergétiques requises, en particulier, par le développement de nouvelles technologies de l'énergie, notamment à faible impact carbone (éolien, photovoltaïque, batteries, etc.) - et,
- d'autre part, de développer les outils, méthodes et technologies permettant d'en proposer une exploitation économiquement performante tout en minimisant l'impact sur l'environnement (surface ou profondeur).

Les actions relevant de cette priorité se déclinent en fonction des ressources concernées, notamment :

- Hydrocarbures de roche compacte : évaluation des ressources, technologies de production alternatives à la fracturation hydraulique préservant la ressources en eau ou limitant l'emprise au sol des exploitations, recherche sur les technologies de fracturation hydraulique (pour conserver une capacité d'arbitrage), méthodologies d'exploration et d'exploitation du gaz de charbon, gazéification souterraine du charbon, etc. ,
- Hydrates de gaz et gaz biogénique : évaluation des ressources et technologies de production,
- Hydrogène naturel : compréhension de l'origine des accumulations; modes de productions industriels,
- Ressources minérales non énergétiques : évaluation des ressources et des besoins de l'industrie (notamment ENR) nationale, intelligence minérale, technologies d'extraction, séparation (hydro et pyro métallurgie) et de purification, recyclage et par extension développement de procédés économes en métaux stratégiques.

Dans un certain nombre de domaines (hydrocarbures de roche mère, hydrogène naturel, etc.) des opérations sur sites et de démonstrations sont indispensables. Par ailleurs, la promotion d'une utilisation décarbonée des énergies fossiles passe par le déploiement de la filière CSCV (captage, transport, stockage et valorisation du CO₂) : la mise en œuvre d'une plate-forme de stockage géologique du CO₂ et des démonstrateurs de valorisation du CO₂ sera également incontournable. (cf. chapitre 4.3.0).

Les acteurs industriels principaux sont: Total, EGL, Hess, Vermilion, Geogreen, parapétrolier national, Veolia, Suez-Environnement, Rhodia, Eramet, AREVA, Recupyl, ...

Les acteurs académiques et de recherche sont : IFPEN, BRGM, INERIS, CNRS, CEA, Université de Lorraine (LRGP Nancy), Universités Bordeaux et Toulouse, etc.

4.2.2 Priorité 2.2 : Une énergie nucléaire durable et sûre

L'énergie nucléaire constitue, depuis la fin des années 80, un élément clé de la sécurité française d'approvisionnement en énergie, même si désormais, la totalité de notre consommation d'uranium naturel (8000 tonnes par an, facilement stockable) a une origine étrangère, ainsi qu'un atout en matière de qualité et de coût de production de l'électricité fournie qui contribuent à la compétitivité de notre industrie. Elle apporte un atout majeur dans la lutte pour réduire les

émissions de CO₂ en fournissant une électricité à très bas niveau d'émissions de CO₂ et peut ainsi favoriser un développement industriel sobre en émissions. Elle représente un secteur économique offrant plus de 400 000 emplois directs, indirects et induits et 6 milliards d'euros d'exportations par an. Compte tenu de ses atouts, elle continuera à contribuer de façon significative à la production d'énergie en France, comme dans de nombreux pays, dans le cadre de mix énergétiques intégrant une part importante d'énergies renouvelables.

Les quatre objectifs suivants sont structurants pour la priorité « une énergie nucléaire durable et sûre » et supposent un parc d'installations expérimentales et un ensemble de compétences développées dans la durée :

- poursuivre l'amélioration de la sûreté du parc existant et celle du conditionnement des déchets radioactifs tout en préservant la compétitivité de la production d'énergie nucléaire,
- adapter le parc existant pour qu'il contribue aux objectifs de la transition énergétique en gagnant en efficacité énergétique par l'utilisation de chaleur fatale et en optimisant son exploitation conjointe avec celle d'un parc important d'énergies renouvelables pour gérer au mieux leur intermittence, et finalement minimiser l'utilisation des énergies fossiles dans leurs différents usages,
- pour le moyen terme, préserver l'avance technologique française dans le domaine des réacteurs et de la fermeture du cycle du combustible, à laquelle concourent les programmes de recherche sur le nucléaire de 4^{ème} génération autour du démonstrateur technologique ASTRID,
- préparer le très long terme à travers le projet ITER et l'étape de démonstration technologique qui suivra pour démontrer la faisabilité d'une production électrique par la fusion thermonucléaire.

L'ANCRE souligne également la nécessité de faire un effort particulier de R&D sur la simulation numérique et les matériaux dans une vision 2030 où coexisteront des réacteurs Gen II pour lesquels la connaissance des effets du vieillissement sera suffisante pour permettre de garantir la sûreté d'une exploitation prolongée et d'une phase de déploiement de réacteurs de Gen III avec des procédés de construction optimisés, l'ensemble offrant des niveaux de sûreté élevés et une exploitation optimisée dans le cadre de mix électriques faisant une large place aux sources renouvelables intermittentes et avec cogénération de chaleur.

Le maintien au meilleur niveau d'outils de modélisation et de simulation numérique des réacteurs nucléaires et du cycle du combustible associé est en effet essentiel pour faire progresser la sûreté des installations et constitue un atout concurrentiel déterminant pour l'industrie nucléaire française et les acteurs du secteur (le concepteur AREVA, l'électricien EDF, le support technique IRSN, l'autorité de sûreté nucléaire ASN, l'agence ANDRA pour la gestion des déchets radioactifs...). Cet objectif appelle la conception d'une plate-forme numérique de simulation multi-physique et multi-échelle qui fédère les outils de simulation des principaux processus relatifs à la thermo hydraulique, la neutronique, la mécanique et la physico-chimie intervenant dans les réacteurs et le cycle du combustible. Cette plate-forme doit permettre d'intégrer une approche scientifique des phénomènes élémentaires découverts par la recherche de base, au moyen de calculs ab initio et de haute performance. En outre, la simulation numérique se révèle essentielle pour étudier plus précisément les situations accidentelles graves impossibles à reproduire expérimentalement, et en particulier celles qui résultent

d'enchaînements de situations imprévisibles comme à Fukushima. La simulation numérique pour l'énergie nucléaire fera aussi progresser d'autres secteurs de l'énergie mettant en jeu les mêmes disciplines scientifiques (à l'exception de la physique des réacteurs).

La recherche sur les matériaux revêt des enjeux considérables pour évaluer la durée de vie des composants dans les réacteurs actuels et pour mettre au point de nouveaux matériaux pour le conditionnement des déchets radioactifs (verres, bétons...), pour les réacteurs à neutrons rapides et pour les réacteurs à fusion. L'assurance de la tenue des matériaux soumis aux différentes sollicitations de l'environnement nucléaire (haute température, irradiation, contraintes mécaniques, corrosion, longue durée...) fait appel à une connaissance de leur structure à l'échelle la plus fine, et à une recherche d'innovation à cette échelle. Cette connaissance est rendue possible par les progrès de la science des matériaux qui allie des moyens d'observation de la matière toujours plus performants (désormais jusqu'à l'échelle des atomes), et des moyens d'élaboration qui permettent de contrôler la microstructure à l'échelle pertinente. La modélisation multi-échelle qui vise à prédire les propriétés des matériaux à partir de la connaissance de leur microstructure est devenue indispensable pour évaluer les effets de l'irradiation sur les aciers de cuve et fonder les autorisations de prolongation d'exploitation sur des bases plus scientifiques, ainsi que pour orienter plus efficacement les recherches de nouveaux matériaux, notamment à travers une approche globale optimisée qui prenne en compte les questions de mise en forme, d'assemblage et d'état de surface. Pour ces raisons, il est essentiel de maintenir une recherche académique d'excellence sur les matériaux pour l'énergie nucléaire.

4.3 Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique

4.3.1 Priorité 3.1 : Captage-transport-stockage et valorisation du CO₂

La filière CSCV s'articule autour de 4 segments principaux : captage, transport, stockage et valorisation du CO₂.

Dans le domaine du captage, les recherches viseront à l'amélioration des performances technico-économiques, énergétiques et environnementales des procédés concernés (postcombustion, précombustion et oxy-combustion), l'application aux unités des industries fortement émettrices (aciéries, cimenteries, raffineries), le fonctionnement en mode flexible, les technologies membranaires, etc.

Dans le domaine du stockage (aquifères salins profonds, gisements d'hydrocarbures épuisés, veines de charbon profondes, etc.), au-delà de la problématique de l'acceptabilité sociétale, les principaux verrous technologiques sont la faisabilité technique et la sécurisation des systèmes de stockage à long terme, qui nécessitent des recherches dans les domaines de la caractérisation des sites, de la modélisation de l'injection de CO₂ et de son devenir dans le temps, du suivi de sites et de la gestion des risques et de la sûreté à long terme. A terme, la création de réseaux de transports entre les différents sites de captage et stockage du CO₂ devra être envisagée.

Enfin, dans le domaine de la valorisation du CO₂, les procédés visant à stocker de l'énergie intermittente pour la réutiliser sous différentes formes (gaz, liquide ou électricité) ou à produire

des molécules et matériaux d'intérêt restent à investiguer pour en minimiser les factures énergétique, économique et environnementale.

Ces recherches devront nécessairement être complétées par des expérimentations sur site (plate-forme de stockage géologique du CO₂, etc.) et des démonstrateurs de valorisation du CO₂ (cf. chapitre 4.2.1).

L'industrie française possède de véritables atouts sur l'ensemble de la filière CSCV tant au niveau des grands groupes industriels (Alstom, Air liquide, Arkema, EDF, Lafarge, Schlumberger, Solvay, Total, GDF SUEZ, Geostock, etc.) qu'au niveau des PME-PMI qui ont un rôle important à jouer pour la fourniture d'études et d'équipements spécifiques, sur la gestion des risques, la conception de sites, l'analyse de sous-sol, etc. .

La filière CSC s'est fortement structurée en France, en particulier autour de l'ADEME, l'IFPEN, le BRGM, et le CNRS, l'IPGP, l'École des Mines Paris Tech ou l'Ineris apportent des compétences complémentaires de haut niveau dans ce domaine. Elle est en cours de structuration autour des industriels, d'IFPEN, du CNRS et du CEA pour ce qui concerne la valorisation du CO₂.

4.3.2 Priorité 3.2 : Efficacité énergétique : gestion de la chaleur fatale

De nombreux procédés industriels de transformations nécessitent l'utilisation de chaleur (métaux, verre, ciment, agro-alimentaire, papeterie, etc.). La chaleur produite par de nombreux procédés industriels est en majeure partie rejetée vers l'atmosphère, souvent à des niveaux dégradés de température (chaleur fatale). De même, les unités de production d'électricité (centrales thermiques, centrales nucléaires) génèrent des rejets thermiques insuffisamment ou non exploités (environ 70 % de l'énergie primaire).

Dans un contexte où la moitié de la consommation nationale d'énergie se fait sous forme de chaleur, l'enjeu de la gestion optimisée de celle-ci est crucial: il s'agit donc de disposer, dans ce domaine où des marges de progrès considérables existent, des technologies de récupération (sous forme de chaleur ou d'électricité), de transport (réseaux) et d'accommodation intelligente entre production et usage final.

Les projets proposés s'articulent autour de trois axes :

- Production
 - Cogénération nucléaire,
 - Aciéries : cokerie, convertisseur, haut-fourneaux,
 - Cimenteries,
 - Raffinage, pétrochimie,
- Briques technologiques
 - Développement de composants pour la récupération de chaleur basse température,
 - Développements de composants pour la récupération de chaleur haute température,
 - Développement de technologies pour la conversion chaleurs électricités,

- Réseaux, usages
 - o Réseau de chaleur à l'échelle territoriale interconnectant producteurs et utilisateurs finaux, démonstrateur territorial (projet montilien),
 - o Transport de chaleur sur une grande distance (100 km).

Les acteurs industriels impliqués sur l'axe « Production » sont : EDF, Véolia (Dalkia), Areva, Arcelor Mittal, Vallourec, Saint-Gobain, Lafarge.

S'agissant de l'axe « Briques technologiques », on compte : Fives Group, Air Liquide, Mersen.

En matière de recherche publique, la France peut s'appuyer sur les expertises du CEA, d'FPEN, de l'IRSN, de CETIAT, de l'IRSTEA, du CNRS et d'universités (thermique, matériaux, gestion des systèmes complexes).

La gestion de la chaleur fatale fait partie d'un des axes forts de recherche de l'institut de recherche et de formation PS2E, Paris – Saclay Efficacité Energétique.

4.4 Priorité 4 : Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables à la mise en œuvre des investissements nécessaires

La transition énergétique s'inscrit dans l'évolution des modes d'organisation sociétale et des systèmes de valeur. Elle propose un nouveau modèle de système énergétique moins centralisé, renforçant le rôle de la société civile tant en matière d'orientation de la politique qu'en matière de responsabilité dans l'équilibre du système. Ce nouveau système amène une nouvelle organisation des pouvoirs et responsabilités qu'il convient d'anticiper, de prendre en considération et de concilier avec les enjeux liés à l'énergie pour la nation, tels que la sécurité d'approvisionnement et la pérennité de la solidarité entre territoires. Outre les défis technologiques, la transition énergétique impliquera des changements aussi bien du point de vue des attitudes et comportements des consommateurs vis-à-vis des choix énergétiques que de l'organisation du secteur de l'énergie avec l'arrivée de nouveaux acteurs et services.

Dans ce contexte, développer des modèles et scénarios énergétiques, pour étudier et anticiper les conséquences des différents choix stratégiques, représente un axe d'étude important pour permettre la mise en avant de modèles économiques pertinents. Dans ce domaine, l'expertise des principaux organismes de recherche - rassemblée au sein de l'ANCRE - est d'ores et déjà mobilisée pour fournir des scénarii énergétiques dans le cadre du débat national sur la transition énergétique.

Les études technico-économiques constituent également un apport précieux pour permettre aux entreprises françaises de proposer des produits innovants, performants économiquement et en phase avec les attentes et capacités d'acceptation sociétales. Réussir le pari de transformer les résultats de la recherche en application innovante, présentant une réelle valeur ajoutée pour le système énergétique et in fine pour une multiplicité de parties prenantes, suppose de lever en temps utile de nombreux verrous non technologiques et donc de mieux comprendre les systèmes de valeurs, les rapports entre la société civile et la production d'énergies, ses modes de diffusion/exploitation et ses usages mais également entre société civile, science et environnement.

Les recherches dans les domaines des sciences politiques, sociales, humaines et économiques sont ainsi essentielles pour accompagner, éclairer la transition, dans le cadre d'une approche holistique. Si l'apport des sciences économiques mérite d'être renforcé, il est d'ores et déjà organisé alors que celui des sciences humaines et sociales a besoin d'être soutenu et valorisé.

A l'instar de l'approche « bottom-up » nécessaire pour permettre l'émergence de concepts innovants, il est indispensable de favoriser l'osmose entre la recherche technologique et la recherche en sciences sociales afin de prendre en considération de façon vertueuse l'apport potentiel du progrès technologique aux réflexions sur l'évolution de nos sociétés. Réciproquement il semble également important de mieux intégrer, dans la démarche de R&D fondamentale et technologique une dimension de recherche sociétale.

Pour l'ANCRE, cet axe de recherche suppose un effort très amont en matière d'éducation et de formation, pour une meilleure compréhension mutuelle de ces deux univers. Au-delà, il conviendrait de faciliter les échanges entre chercheurs, notamment dans le cadre des réseaux de prospective. L'apport des SHS devrait également être valorisé notamment dans le cadre des programmes d'expérimentations et démonstrateurs pour une meilleure prise en considération - dès la conception des programmes - des verrous ou freins non technologiques, ainsi que des impacts organisationnels et sociétaux.

L'ANCRE attire l'attention sur le risque que présenteraient d'adopter des démarches uniquement centrées sur les modes de fonctionnement et systèmes de valeurs français (voire occidentaux, ou à tout le moins européens) notamment au regard d'enjeux et de problématiques qui transcendent très largement les frontières d'une nation.

Cette priorité doit être développée en tant que de besoin en liaison avec l'alliance ATHENA.

4.5 Priorité 5 : Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie

La genèse des ruptures technologiques nécessaires à la transition énergétique, s'articulant entre améliorations des systèmes énergétiques actuels et préparation des révolutions technologiques à l'horizon 2030, devra s'appuyer sur la création de connaissances fondamentales et génériques au meilleur niveau international. Ces connaissances génériques sont par nature disséminées dans un grand nombre de disciplines scientifiques et ne sont pas nécessairement appliquées à l'énergie. L'un des enjeux majeurs est de mobiliser les chercheurs de ces disciplines sur des applications potentielles dans le domaine de l'énergie, tout en garantissant l'excellence de ces disciplines au meilleur niveau. Par ailleurs, si des concepts de base de grande qualité et potentiellement générateurs de ruptures existent, le cloisonnement disciplinaire rend difficile la mobilisation de ces concepts dans le domaine énergétique, requérant une approche plus systémique et en général pluridisciplinaire.

Pour cela, l'ANCRE préconise un renforcement du soutien accordé à la recherche fondamentale dans les domaines susceptibles de trouver des applications dans l'énergie ainsi que la mise en place de programmes faiblement thématiques, de type bottom-up, destinés à mobiliser les acteurs de la recherche fondamentale sur des projets ayant une finalité liée au domaine de l'énergie (programmes « concepts innovants pour l'énergie »).

Par ailleurs, l'ANCRE recommande qu'une analyse systématique des potentialités des projets à aller jusqu'à une preuve de concept soit réalisée (possibilité de passer à TRL 3). Cette démarche

sera complétée si nécessaire par une étude technico-économique dans le but de capitaliser et exploiter les résultats des projets les plus prometteurs.

Enfin l'ANCRE estime que la mise en place de réseaux thématiques pluridisciplinaires, soutenus dans la durée, sera de nature à assurer une bonne osmose entre recherche fondamentale et finalisée.

5. Tableau de synthèse des priorités pour la SNR(E)

Les priorités proposées par l'ANCRE pour la SNR(E) sont rappelées ci-dessous. Une proposition de hiérarchisation est ajoutée sur la base des analyses SWOT de chacun des domaines et de l'appréciation de leur importance pour le système énergétique national et la transition énergétique. Un accent particulier est mis sur les domaines où l'augmentation structurée de l'effort de recherche pourra apporter un effet de levier maximum par rapport à l'existant.

Priorités	Déclinaison	Thèmes/Domaines	Niveau de priorité par rapport au niveau des moyens affectés actuels
Priorité 1 : Accélérer les efforts de R&D sur les invariants des scénarios de transition énergétique	Priorité 1.1 : Stockage de l'énergie, inter-conversion et interopérabilité entre vecteurs, réseaux intelligents		++
	Priorité 1.2 : Efficacité énergétique des usages bâtiment, transport et industries	Bâtiment et ville durable	+
		Green IT	+
		Transport et mobilité	+
		Industrie	=
	Priorité 1.3 : développement des filières ENR	Biomasse Gen2 et Gen3	+
		Solaire	+
		EMR	=
		Géothermie	+
Priorité 2 : Jouer des atouts compétitifs des filières énergétiques majoritaires dans le bouquet énergétique national et veiller à la sécurité d'approvisionnement en ressources stratégiques	Priorité 2.1: Optimisation des ressources énergétiques et minérales stratégiques	Ressources non conventionnelles (H2, hydrocarbures)	++
		Métaux stratégiques	++
	Priorité 2.2 : Une énergie nucléaire durable et sûre	Fission	=
		Fusion	=
Priorité 3 : Préparer les ruptures technologiques à fort impact potentiel sur la transition énergétique	Priorité 3.1: Efficacité énergétique : gestion de la chaleur fatale		++
	Priorité 3.2 : Capture stockage valorisation CO ₂		+
Priorité 4 : Mieux comprendre les comportements et développer des modèles de marché favorables à la mise en œuvre des investissements nécessaires			+
Priorité 5 : Favoriser l'émergence de concepts innovants pour l'énergie			++